

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
Escuela Profesional de ingeniería civil



*Una Institución Adventista*

**Evaluación del valor normativo y el valor cuantificado del factor  
de reducción de fuerza sísmica en sistemas pórtico, empleando  
análisis estático no lineal**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

**Autor:**

Bach. Eliser Franklin Espinoza Romero

**Asesor:**

Mg. Roberto Roland Yoctun Rios

Lima, noviembre de 2021

## DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DE TESIS

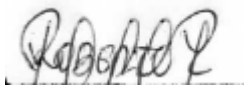
Mg. Roberto Roland Yoctun Rios, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“EVALUACIÓN DEL VALOR NORMATIVO Y EL VALOR CUANTIFICADO DEL FACTOR DE REDUCCIÓN DE FUERZA SÍSMICA EN SISTEMAS PÓRTICO, EMPLEANDO ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL”** constituye la memoria que presenta el Bachiller Eliser Franklin Espinoza Romero para obtener el título de Profesional de ingeniero civil, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 23 días del mes de noviembre del año 2021.



---

Roberto Roland Yoctun Rios

# ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a los **23** día(s) del mes de **noviembre** del año 2021 siendo las **11:00 horas**, se reunieron en modalidad virtual u online sincrónica, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: **Mg. Leonel Chahuares Paucar**, el secretario: **Mg. John Elvis La Torre Esquivel** y los demás miembros: **Ing. David Diaz Garamendi** y el asesor **Mg. Roberto Roland Yoctun Rios**, con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: "Evaluación del valor normativo y el valor cuantificado del factor de reducción de fuerza sísmica en sistemas pórtico, empleando análisis estático no lineal"

.....de el(los)/la(las) bachiller/es: a)..... **ELISER FRANKLIN ESPINOZA ROMERO...**

.....b) .....

.....conducente a la obtención del título profesional de

.....**INGENIERO CIVIL**.....

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): ..... **ELISER FRANKLIN ESPINOZA ROMERO** .....


CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	<b>16</b>	<b>B</b>	<b>BUENO</b>	MUY BUENO

Candidato (b): .....

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

\_\_\_\_\_  
Presidente  
Mg. Leonel  
Chahuares  
Paucar

  
\_\_\_\_\_  
Mg. John Elvis La Torre Esquivel  
Secretario  
Mg. John Elvis La  
Torre Esquivel

\_\_\_\_\_  
Asesor  
Mg. Roberto  
Roland Yoctun  
Rios

\_\_\_\_\_  
Miembro  
Ing. David Diaz  
Garamendi

\_\_\_\_\_  
Miembro  
----

\_\_\_\_\_  
Candidato/a (a)  
Eliser Franklin  
Espinoza Romero

\_\_\_\_\_  
Candidato/a (b)  
---

# **Evaluación del valor normativo y el valor cuantificado del factor de reducción de fuerza sísmica en sistemas pórtico, empleando análisis estático no lineal**

ELISER FRANKLIN ESPINOZA\* ROBERTO ROLAND YOCTUN RIOS

*EP. Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Perú.*

## **Resumen**

La presente investigación, evalúa el valor normativo y el valor cuantificado del factor de reducción de fuerza sísmica (R) en sistemas pórticos de concreto armado, empleando el análisis estático no lineal (pushover) con el objetivo de constatar si el valor normativo "R" de la NTP E.030 Diseño sismorresistente se está subestimando. Para ello se propuso cuatro muestras de sistemas pórticos de 3, 6, 9 y 12 niveles sin irregularidad ubicadas en el mapa de zonificación peruano de la zona 4, teniendo un uso de edificación comercial de categoría B. La metodología del análisis Pushover es muy utilizado para evaluar la capacidad sísmica resistente de las estructuras, en este caso, se efectuó el análisis en el software estructural Etabs, mediante el cual, nos permitió también cuantificar a través de las curvas de capacidad un valor del factor de reducción de fuerza sísmica R. Posteriormente, se evaluó este parámetro en función al periodo natural, deriva máxima y variables independientes que gobiernan la formulación del factor R proporcionada por la ATC-19 (1995). De manera que, se pueda corroborar si el valor normativo "R" en sistemas pórtico se está subestimando. El desarrollo de esta investigación tiene como colaboración ampliar el conocimiento del factor "R" empleados en sistemas pórticos y poder diseñar estructuras aporticadas más eficientes y seguras.

**Palabras clave:** Pushover, curva de capacidad, factor de reducción, factor por ductilidad, factor de sobrerresistencia y factor de redundancia.

## **Abstract**

This research evaluates the normative value and the quantified value of the seismic force reduction factor (R) in reinforced concrete portal frame systems, using nonlinear static analysis (pushover) in order to determine whether the normative value "R" of the NTP E.030 Seismic-resistant design is being underestimated. For this purpose, four samples of portico systems of 3, 6, 9 and 12 levels without irregularity located in the Peruvian zoning map of zone 4, having a commercial building use of category B, were proposed. The Pushover analysis methodology is widely used to evaluate the seismic resistant capacity of the structures, in this case, the analysis was performed in the Etabs structural software, which also allowed us to quantify through the capacity curves a value of the seismic force reduction factor R. Subsequently, this parameter was evaluated according to the natural period, maximum drift and independent

variables that govern the formulation of the R factor provided by the ATC-19 (1995). In this way, it can be corroborated if the normative value "R" in portal systems is being underestimated. The purpose of this research is to increase the knowledge of the "R" factor used in portal frame systems and to be able to design more efficient and safer portal frame structures.

**Keywords:** Pushover, capacity curve, reduction factor, ductility factor, over-resistance factor and redundancy factor.

*\*Correspondencia de autor: Km. 19 Carretera Central, Ñaña, Lima. E-mail: [eliserespinoza@upeu.edu.pe](mailto:eliserespinoza@upeu.edu.pe)*

## INTRODUCCION

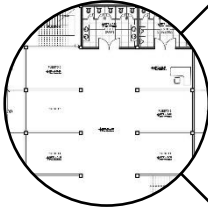
El factor de reducción de fuerza sísmica R es el parámetro central del análisis elástico en las disposiciones de diseño sísmico y directrices (ATC 1978; UBC 1997; FEMA 1997; FEMA 2000; IBC 2000) durante más de 20 años, ya que se utiliza para contabilizar el comportamiento no lineal del sistema estructural. En su formulación inicial R se definió como el producto de un factor basado en la ductilidad  $R_\mu$  y un factor basado en la fuerza  $R_s$ . El factor  $R_\mu$  basado en la ductilidad captura la respuesta no lineal global de un sistema estructural. Relaciones para evaluar  $R_\mu$  como función del período estructural y capacidad de ductilidad estructural global han sido formulados por varios investigadores (Newmark y Hall 1982; Krawinkler y Nassar 1992; Miranda y Bertero 1994). Sin embargo, todas las expresiones desarrolladas se basan en la premisa de que la respuesta no lineal de un edificio de varios pisos puede ser modelado por la respuesta no lineal de un solo grado de libertad del sistema (Tsopelas y Husain, 2004).

La Norma Técnica Peruana E.030 (2019) de Diseño Sismorresistente proporciona valores del factor de reducción de fuerza sísmica para diversas tipologías de sistema estructural. Este reglamento es uno de las más exigentes en especificar el factor (R) a comparación de otras normas, como el Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10 que solo establece para casos mínimos, moderados y especiales. Pero la norma Ecuatoriana de Construcción NEC también es muy exigente en este parámetro. Sin embargo, los reglamentos de diseño sísmico de estos 3 países colindantes poseen diferentes valores con respecto a este valor establecido. (Aguilar, 2007).

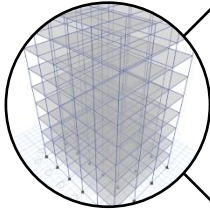
La mayoría de los reglamentos actuales establecen los coeficientes de reducción de fuerza sísmica (R) en función de los valores de deriva reglamentados por ellos, lo que les permite, a pesar de poseer valores de R que pueden ser considerados elevados. (Morejón, 2018).

Por otro lado, el factor R es variable entre varias normativas, por ello se puede inferir que está en función de otros parámetros, el cual se analiza en esta investigación y posteriormente se obtiene valores objetivos. Es muy interesante saber que existe una gran discrepancia en un parámetro normativo que está en función del tipo de sistema estructural. Esto en parte se debe a que estos valores tienen más, un respaldo cualitativo que cuantitativo, provienen más de la opinión de experto (Daza - Duarte, 2003). A raíz de esta incertidumbre se puede inferir que se conoce en menor escala el origen de este factor (R). Entonces se estaría diseñando las estructuras para fuerzas sísmicas muy bajas o altas.

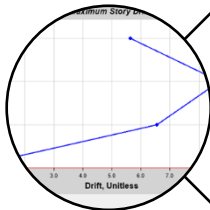
## METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN



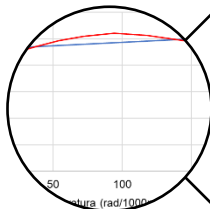
De los 4 casos de estudio de sistemas pórticos de 3, 6, 9 y 12 niveles típicos de uso comercial se modeló y cuantificó las cargas gravitacionales en el software estructural Etabs.



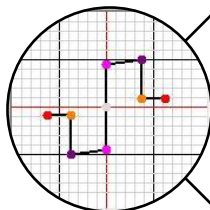
Se modeló en el software estructural Etabs y se desarrolló un Análisis Dinámico Modal Espectral con fines de diseño, respetando los parámetros de diseño de la Norma Peruana E.030 y E.060.



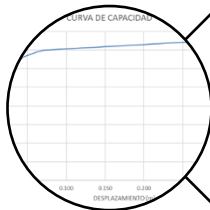
Se verificó las condiciones normativas para el diseño de los elementos estructurales, se controló las distorsiones angulares, cortante mínima, relación de columna fuerte y viga débil para garantizar el buen diseño de estos elementos para la incursión al rango inelástico.



Se diseñó las vigas y columnas para evaluar las secciones críticas en ambas direcciones, se extrajo los diagramas de momento curvatura y se idealizó mediante el modelo bilineal para definir valores objetivos.



En base a los valores definidos de los diagramas Momento - Curvatura se definió las regiones plásticas para los diferentes casos de estudios.



Se corrió el programa con el análisis Pushover en base a los valores definidos y se extrajo las curvas de capacidad para cada caso de estudio. Donde se determinó parámetros elásticos e inelásticos, seguidamente se calculó el factor de reducción de fuerza sísmica con el producto propuesto en la ATC-19 (1995).

## CASOS DE ESTUDIOS

### Descripción de los casos de estudio

Se consideró 4 muestras de edificaciones de tipología estructural aporticada (figura 1), donde la primera y segunda muestra poseen 3 y 6 niveles, el tercero y cuarto con 9 y 12 niveles respectivamente, estos especímenes representan centros comerciales de distintas alturas clasificadas en categoría B (edificaciones importantes) según la Norma Técnica Peruana (NTP) E.030, la altura por cada nivel es de 3.50m en cada caso. Por otro lado, es necesario especificar que, el campo de acción se encuentra ubicado en la zona 4 además, las plantas de los especímenes son típicas como se muestra en el plano A-01.

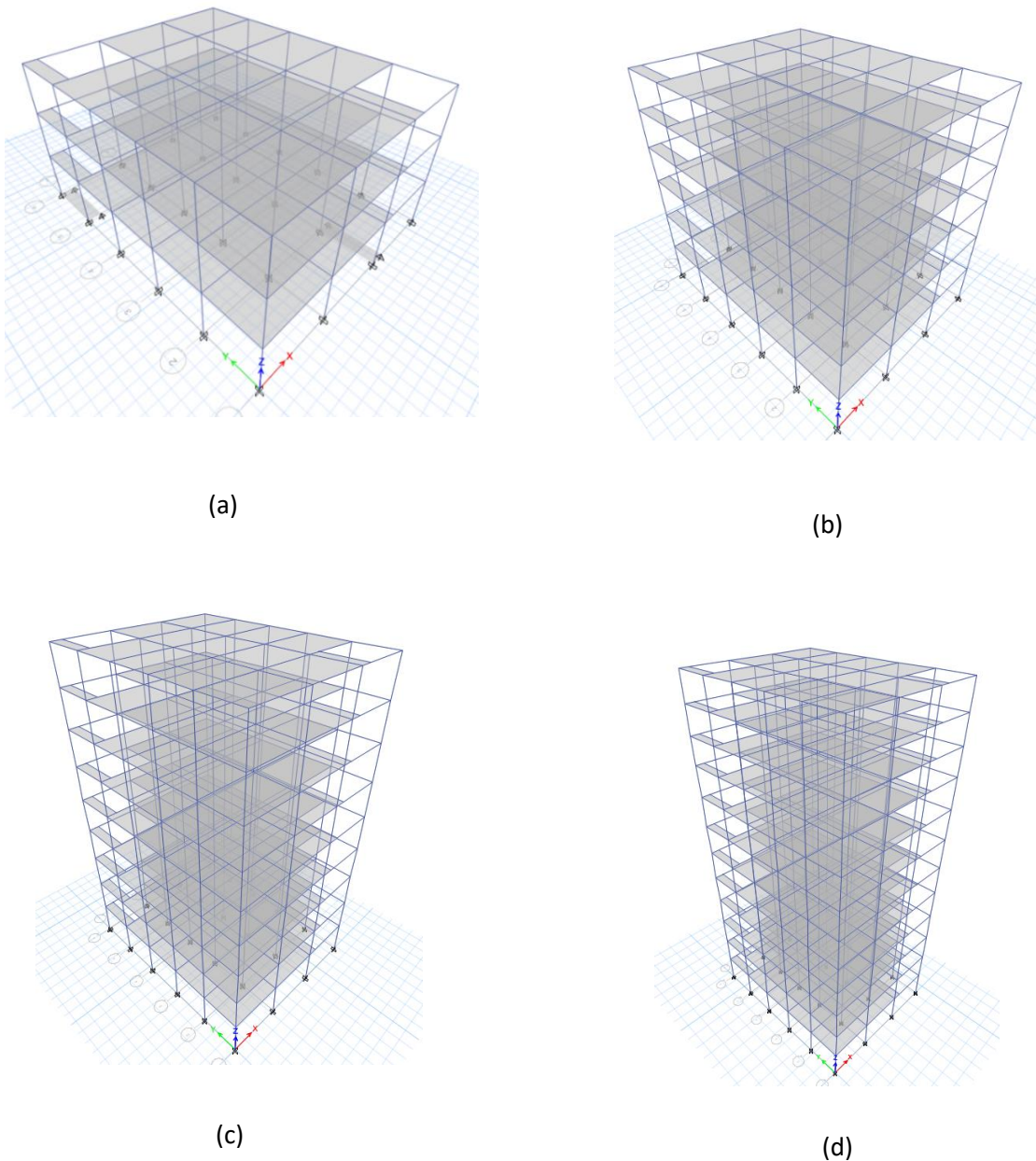
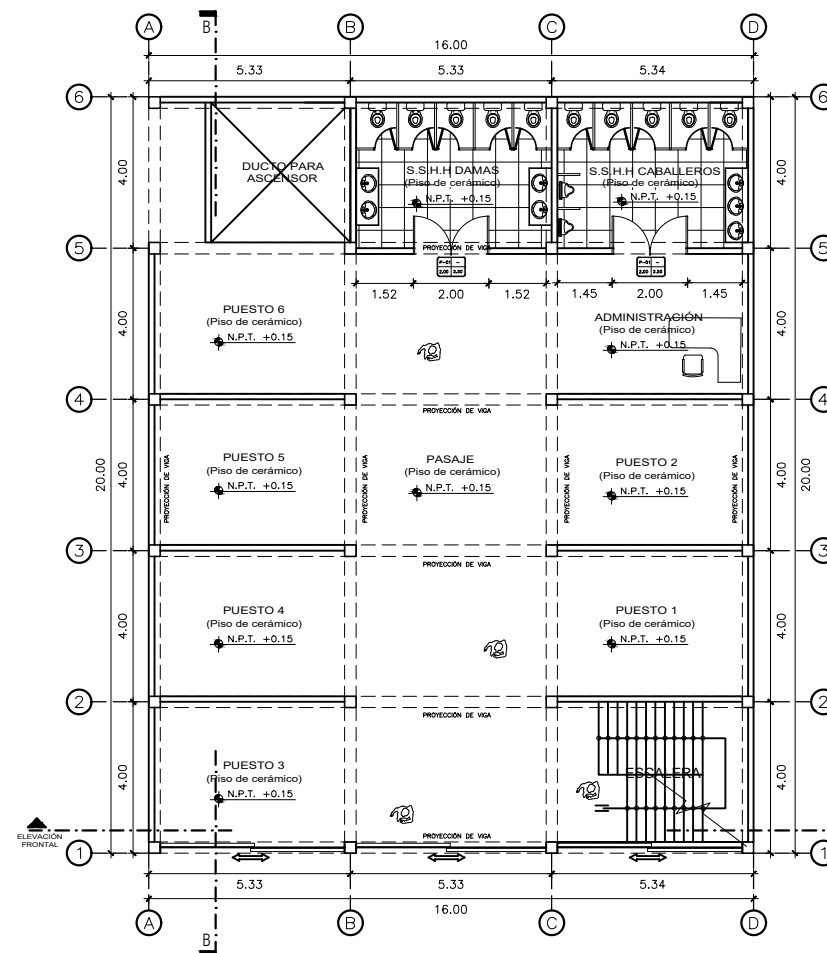
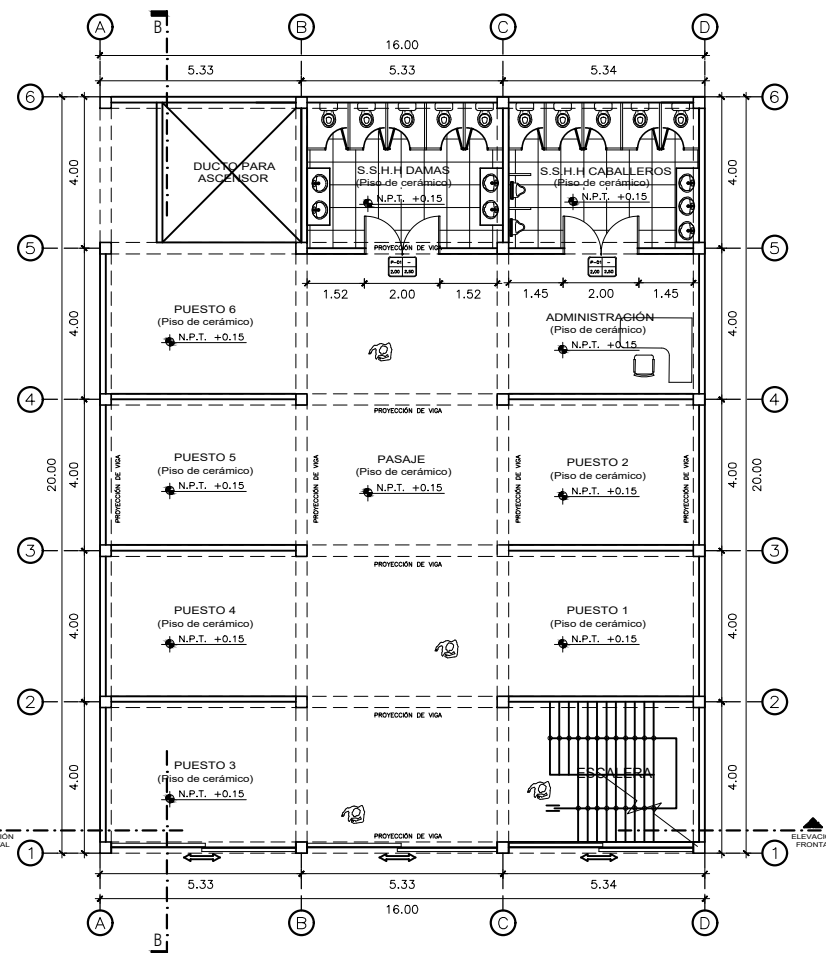


Figura 1. Casos de estudios  
(a) Primer caso de estudio, (b) segundo caso de estudio, (c) tercer caso de estudio  
y (d) cuarto caso de estudio

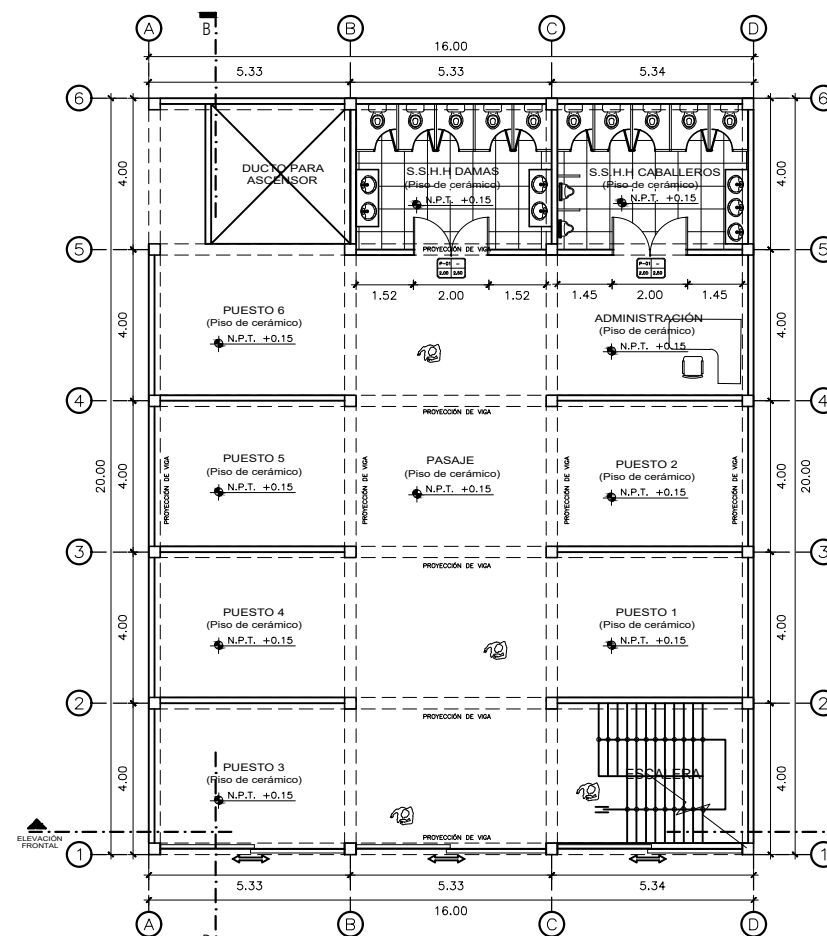
*Elaboración: Propia*



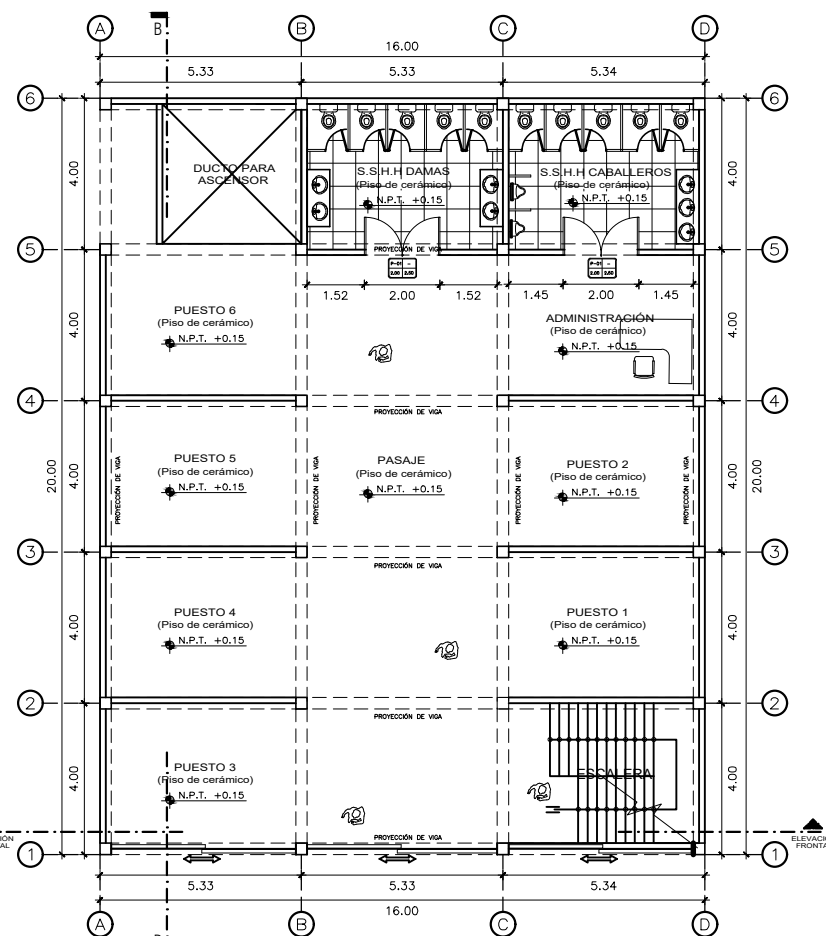
PLANTA TÍPICA 1° MUESTRA  
ESC: 1/200



PLANTA TÍPICA 2° MUESTRA  
ESC: 1/200



PLANTA TÍPICA 3° MUESTRA  
ESC: 1/200



PLANTA TÍPICA 4° MUESTRA  
ESC: 1/200



ESCUELA  
PROFESIONAL DE  
INGENIERÍA CIVIL

PRIMER AUTOR:

ELISER FRANKLIN  
ESPINOZA ROMERO

SEGUNDO AUTOR:

ROBERTO ROLAND  
YOCTUN RIOS

PROYECTO:

**PROYECTO DE  
INVESTIGACIÓN**

PLANO TÍTULO:

**ARQUITECTURA  
PLANTAS DE LAS 4  
MUESTRAS**

UBICACIÓN:

LIMA

ESCALA :

1 / 200

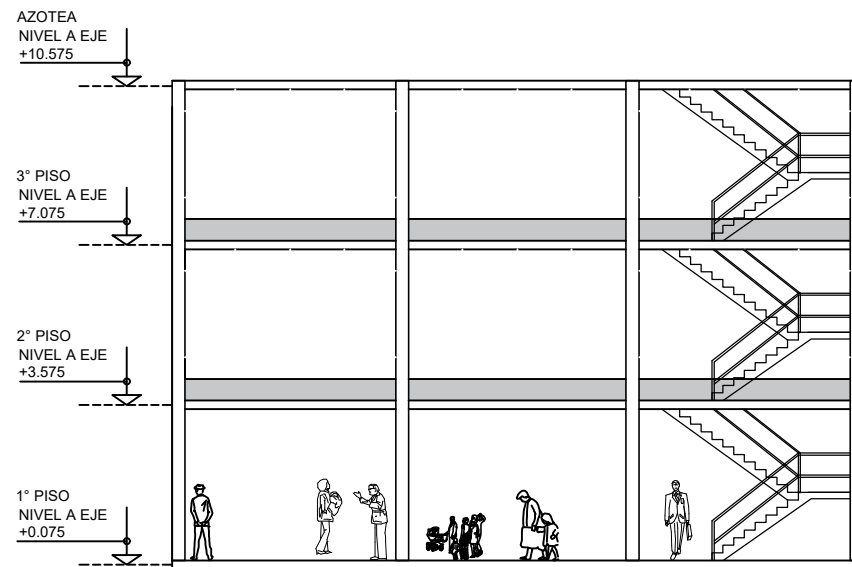
FECHA :

22-10-2021

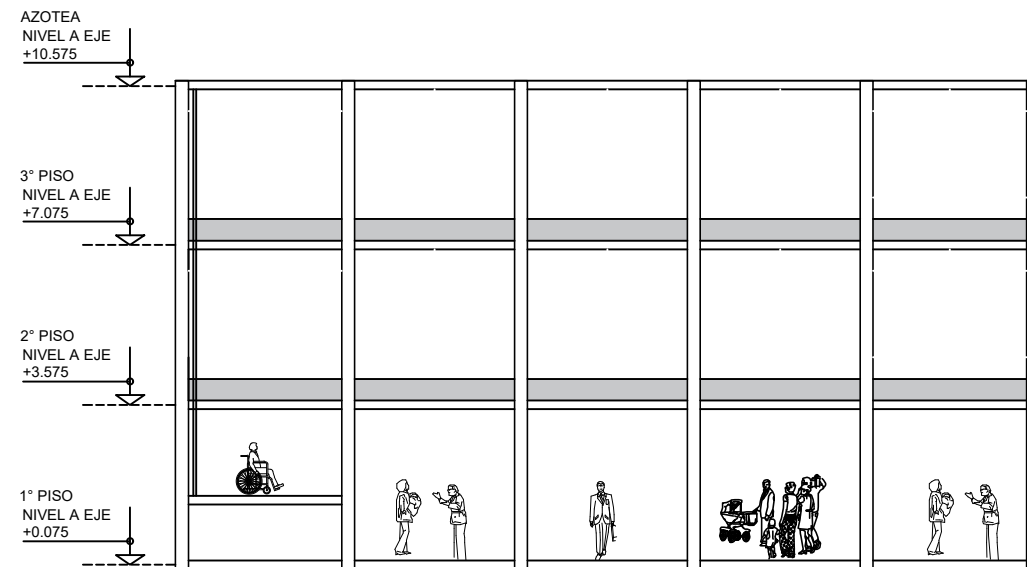
LÁMINA :

**A-01**

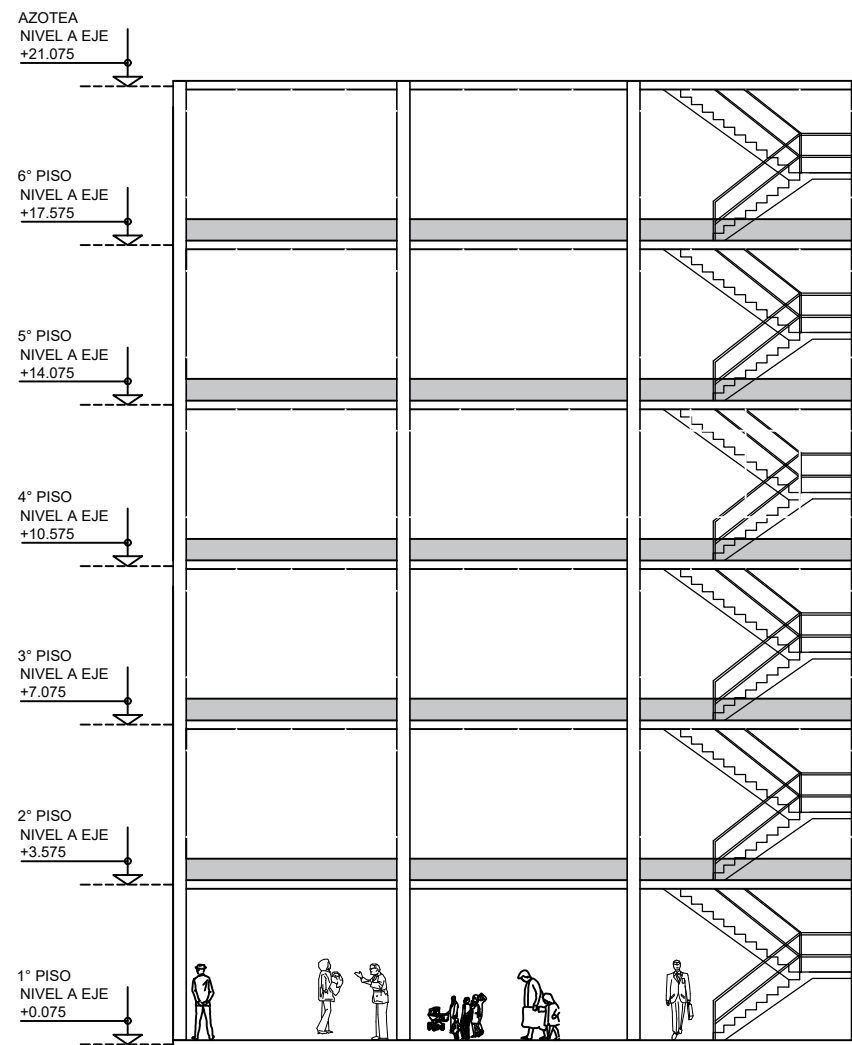




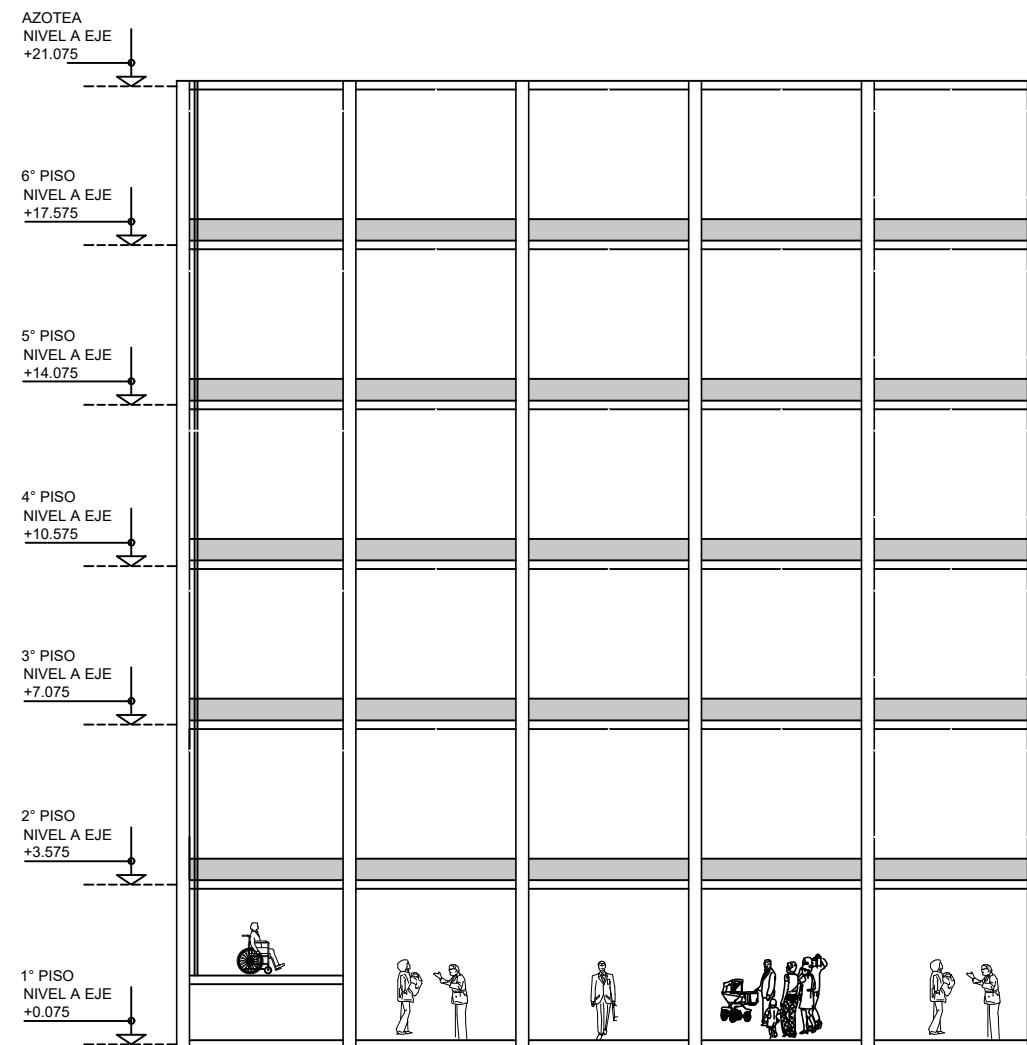
ELEVACIÓN FRONTAL 1° MUESTRA  
ESC: 1/175



CORTE B-B 1° MUESTRA  
ESC: 1/175



ELEVACIÓN FRONTAL 2° MUESTRA  
ESC: 1/175



CORTE B-B 2° MUESTRA  
ESC: 1/175



ESCUELA  
PROFESIONAL DE  
INGENIERÍA CIVIL

PRIMER AUTOR:

ELISER FRANKLIN  
ESPINOZA ROMERO

SEGUNDO AUTOR:

ROBERTO ROLAND  
YOCTUN RIOS

PROYECTO:

**PROYECTO DE  
INVESTIGACIÓN**

PLANO TÍTULO:

**ARQUITECTURA  
ELEVACIÓN Y CORTE  
1° Y 2° MUESTRA**

UBICACIÓN:

LIMA

ESCALA :

1 / 175

FECHA :

22-10-2021

LÁMINA :

**A-02**



ESCUELA  
PROFESIONAL DE  
INGENIERÍA CIVIL

PRIMER AUTOR:

ELISER FRANKLIN  
ESPINOZA ROMERO

SEEGUNDO AUTOR:

ROBERTO ROLAND  
YOCTUN RIOS

PROYECTO:

**PROYECTO DE  
INVESTIGACIÓN**

PLANO TÍTULO:

**ARQUITECTURA  
ELEVACIÓN Y CORTE  
3° Y 4° MUESTRA**

UBICACIÓN:

LIMA

ESCALA :

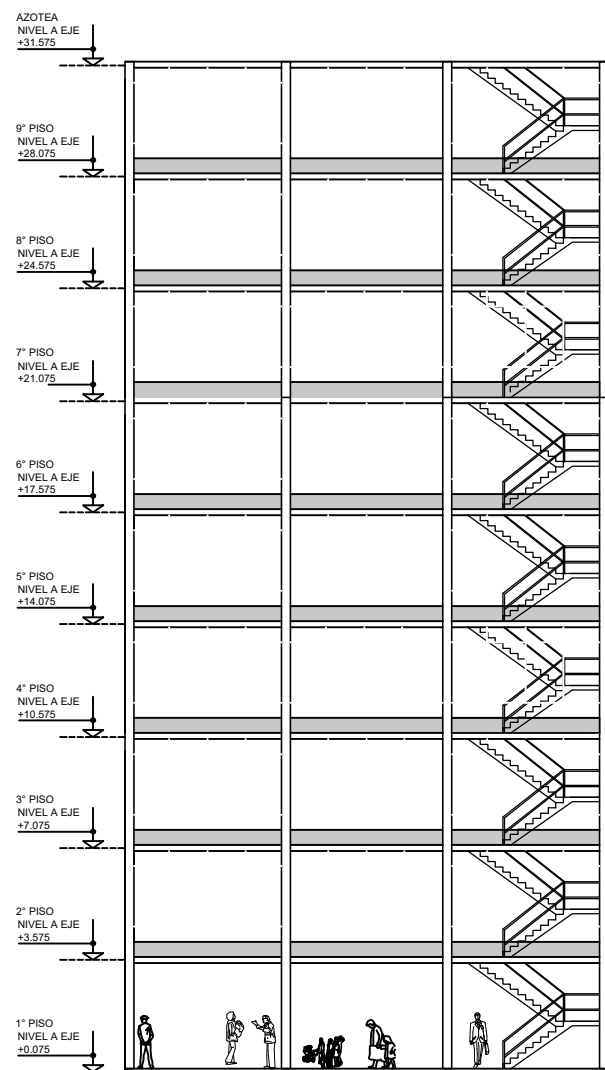
1 / 250

FECHA :

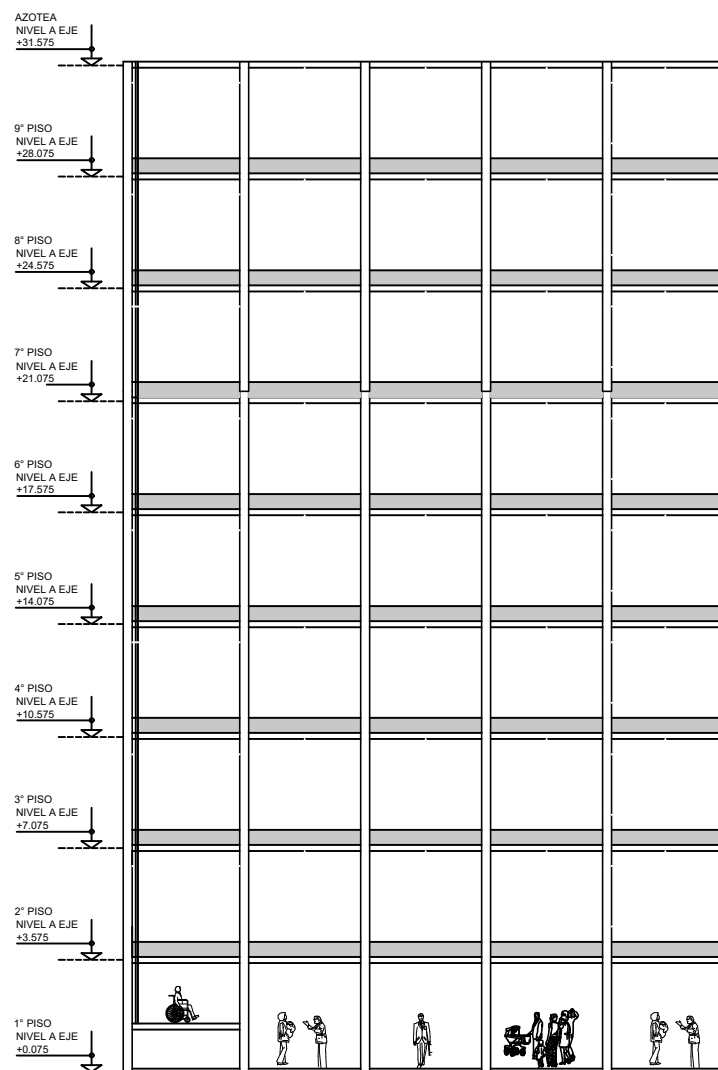
22-10-2021

LÁMINA :

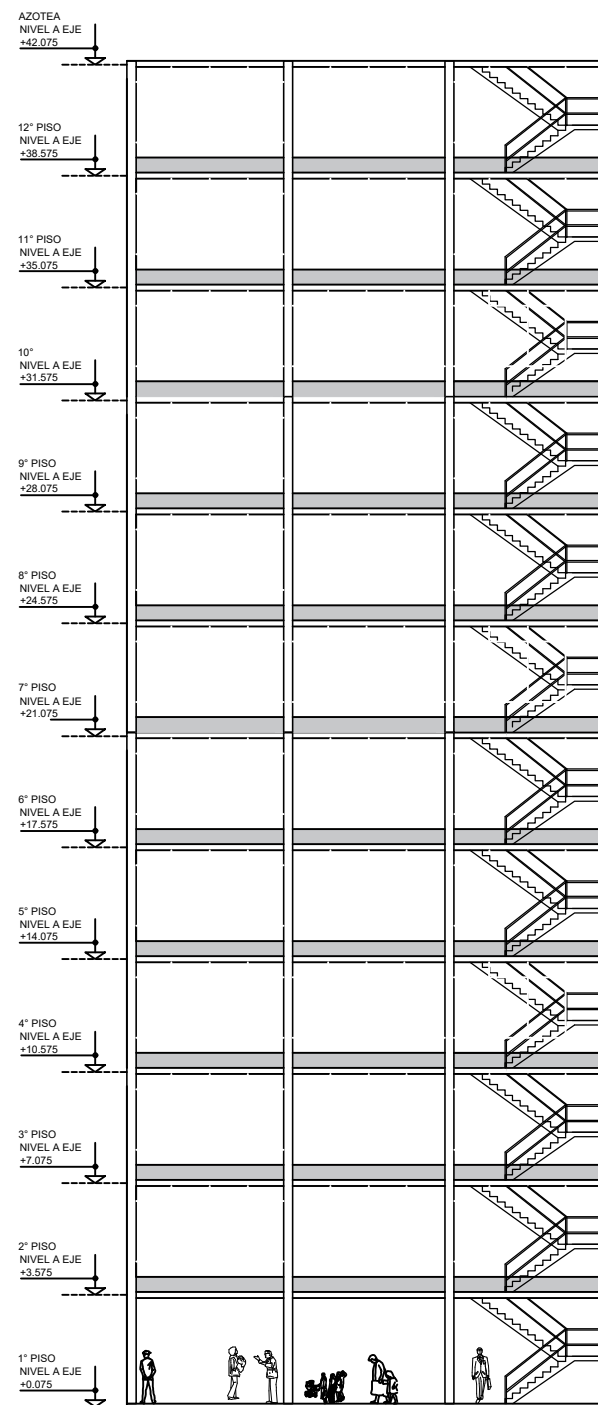
**A-03**



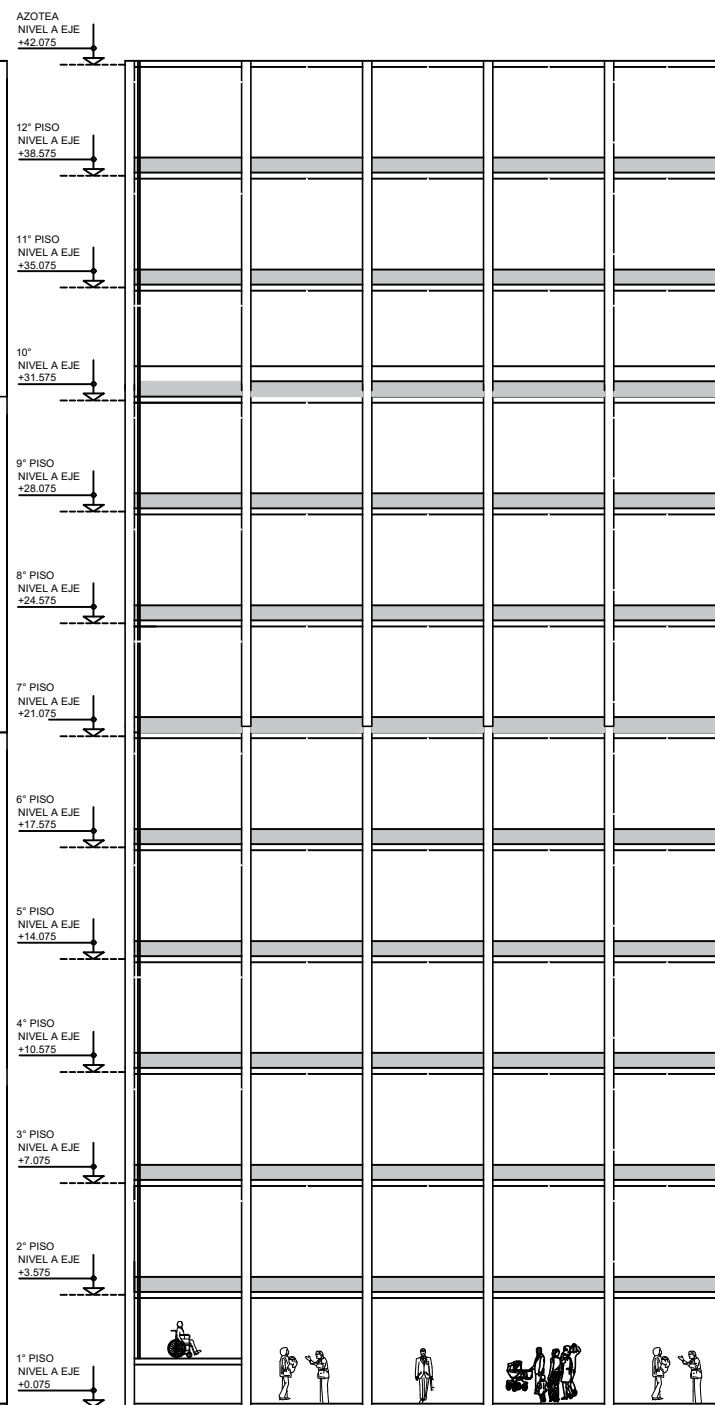
ELEVACIÓN FRONTAL 3° MUESTRA  
ESC: 1/250



CORTE B-B 3° MUESTRA  
ESC: 1/250



ELEVACIÓN FRONTAL 4° MUESTRA  
ESC: 1/250



CORTE B-B 4° MUESTRA  
ESC: 1/250

## **DESCRIPCIÓN DE PLANOS:**

Se da a conocer 3 láminas de planos de la especialidad de arquitectura con fines de modelamiento, estructuración y análisis estático no lineal.

El plano de título (Arquitectura, plantas de las 4 muestras) contiene la distribución de ambientes de los 4 casos de estudio que está representada por una planta típica (lámina A-01), por ello si desea conocer la altura de los entrepisos es necesario ver los planos de corte y elevación (lámina A-02 y A-03).

Por otro lado, el plano de título (Arquitectura, elevación y corte 1° y 2° muestra) contiene la representación de la elevación frontal y corte B-B del primer y segundo caso de estudio que muestran las alturas de entrepiso y otra vista de ángulo (lámina A-02). Así mismo, el plano de título (Arquitectura, elevación y corte 3° y 4° muestra) representa la elevación frontal y corte B-B del tercer y cuarto caso de estudio (lámina A-03).

Del caso 01, se tiene una arquitectura de un centro comercial como se muestra en el plano A-01, además, esta cuenta con 3 niveles de piso, también se puede apreciar su elevación y corte B-B en el plano A-02.

En el siguiente caso 02, se tiene la misma arquitectura de un centro comercial como se muestra en el plano A-01 con 6 niveles de piso, igualmente se presenta su corte y elevación para tener una perspectiva de modelo propuesto y obtener las alturas de entrepiso en el plano A-02

En el caso 03 y 04 se propone la misma distribución de arquitectura (plano A-01) con 9 y 12 niveles de piso respectivamente con el objetivo de simplificar el modelo y centrarnos en la respuesta del factor de reducción de fuerza sísmica. Así mismo, se presenta los modelos de elevación y corte (plano A-03).

Conviene recordar que, las elevaciones no solo representan la cara frontal de una edificación, Si no también, es útil para extraer las alturas por nivel. El cual es un factor importante para el modelamiento de cualquier estructura, para este caso se presenta la elevación típica para los casos de estudio. Sin embargo, la característica principal es el cambio de niveles que posee cada caso de estudio.

## CARACTERÍSTICAS DE LOS CASOS ANALIZADOS

### Cargas:

Las cargas actuantes en pórticos de la Tabla 1 se determinó en base a la arquitectura presentada, respetando las condiciones de la Norma Técnica Peruana E.020 Cargas. Es necesario tener en cuenta que el software estructural Etabs calcula y considera el peso propio de los elementos estructurales.

Tabla 1. Cargas actuantes en pórticos

*Elaboración: Propia*

Story	Descripción	Carga	Patrón de carga
All	Acabados	100 kg/m (1.0 kN/m)	DEAD
	Muros y tabiquería	100 kg/m (1.0 kN/m)	DEAD
	Peso propio de losa aligerada	300 kg/m (3.0 kN/m)	DEAD
	Carga viva	500 kg/m (5.0 kN/m)	LIVE
	Carga viva en azotea	100 kg/m (1.0 kN/m)	LIVE

### Propiedades del concreto:

La resistencia del concreto para todos los casos de estudio es  $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$  (21 MPa) como se muestra en la figura 2. Además, se observa también sus propiedades mecánicas de entrada.

Figura 2. Propiedades del concreto  $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$  (21 MPa)

*Elaboración: Propia*

## Propiedades del acero:

Las propiedades del acero se dan a conocer en la figura 3. Tratándose del acero corrugado ASTM A615 de grado 60 el cual se empleó para el análisis y evaluación de esta investigación.

The image shows a 'Material Property Data' dialog box with the following sections and values:

- General Data**
  - Material Name: A615Gr60
  - Material Type: Rebar
  - Directional Symmetry Type: Uniaxial
  - Material Display Color: Blue
  - Material Notes: (empty)
- Material Weight and Mass**
  - ☒ Specify Weight Density
  - Weight per Unit Volume: 7850 kgf/m³
  - Mass per Unit Volume: 0.8 tonf-s²/m⁴
- Mechanical Property Data**
  - Modulus of Elasticity, E: 21000000 tonf/m²
  - Coefficient of Thermal Expansion, A: 0.0000117 1/C
- Design Property Data**
  - Modify/Show Material Property Design Data...
- Advanced Material Property Data**
  - Nonlinear Material Data...
  - Material Damping Properties...
  - Time Dependent Properties...

Buttons: OK, Cancel

Figura 3. Propiedades del acero  $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$  (420 MPa)

*Elaboración: Propia*

## Espectro de respuesta según NTP E.030

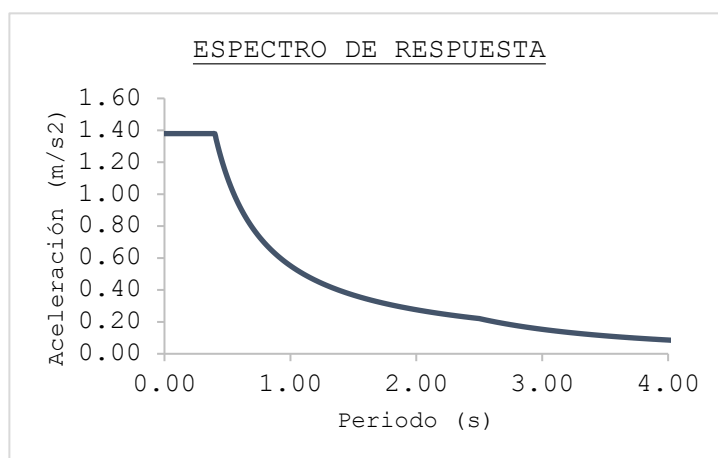


Figura 4. Espectro de respuesta NTP E.030

*Elaboración: Propia*

La Norma Técnica Peruana E.030 (2019) de Diseño Sismorresistente menciona que:

Cualquier estructura puede ser diseñada usando resultados del análisis dinámico por combinación modal espectral (figura 4).

En esta investigación se realizó el respectivo análisis para cada caso de estudio con fines de diseño y posteriormente se evaluó con Análisis estático no lineal.

## **CONTROL DE DISEÑO**

### **Verificación de irregularidad torsional:**

Debido a los ductos de la escalera y ascensor que se observa en las arquitecturas de los casos de estudio se analizó la irregularidad en planta, en este caso la Norma E.030 define que, se debe considerar la irregularidad torsional solo si, la relación del desplazamiento máximo entre el desplazamiento promedio del entrepiso analizado es mayor a 1.3. Por tanto, bajo esta condición se verificó que no existe irregularidad torsional en las 4 muestras analizadas.

### **Cortante mínima**

Es necesario, controlar varios parámetros de la NTP E.030 para el diseño de los elementos estructurales de cada caso de estudio, esto implica controlar la cortante mínima que está definida por la E.030. Donde la cortante dinámica debe ser mayor al 80% de la cortante estática, de lo contrario esta debe ser escalada proporcionalmente. Para este caso, solo se escaló la cortante de diseño del caso 2.

### **Distorsión de entrepiso**

La Norma Técnica Peruana E.030 (2019) de Diseño Sismorresistente, establece el valor de 0.007 para la distorsión de entrepiso en concreto armado. Además, establece el parámetro de 0.75R para el control de derivas inelásticas. Por tanto, para todos nuestros casos de estudios se controló estas distorsiones de forma rigurosa para cumplir y garantizar el buen diseño de los elementos estructurales.

### **Criterio de columna fuerte y viga débil:**

En el caso de estructuras de concreto armado se puede aplicar principios de diseño para garantizar que el sistema estructural pueda soportar la incursión al rango inelástico sin decaimiento significativo de su resistencia. En este caso el mecanismo de columna fuerte y viga débil (Chaparro, 2021)

De acuerdo con Yzaguirre (2021) el cumplimiento del principio de columna fuerte y viga débil garantiza el mecanismo de colapso donde las rótulas plásticas surjan, primeramente, en las vigas.

La Norma E.060, establece que la suma de momentos nominales en flexión de las columnas que llegan al nudo debe ser mayor o igual a 1.2 veces la suma de momentos nominales en flexión de las vigas que llegan al nudo. Por consiguiente, se verificó y controló este criterio bajo la normativa peruana.

## Diseño de secciones de análisis:

El diseño por capacidad asegura la formación de rótulas plásticas en ubicaciones predefinidas evitando así la formación de otros modos de deformación inelástica que podría resultar en falla frágil (Ordóñez *et al.*, 2020).

Por ello se realizó el diseño de los elementos estructurales verificando las condiciones de diseño de resistencia y capacidad en base a los aceros requeridos obtenido del análisis y diseño del software estructural Etabs.

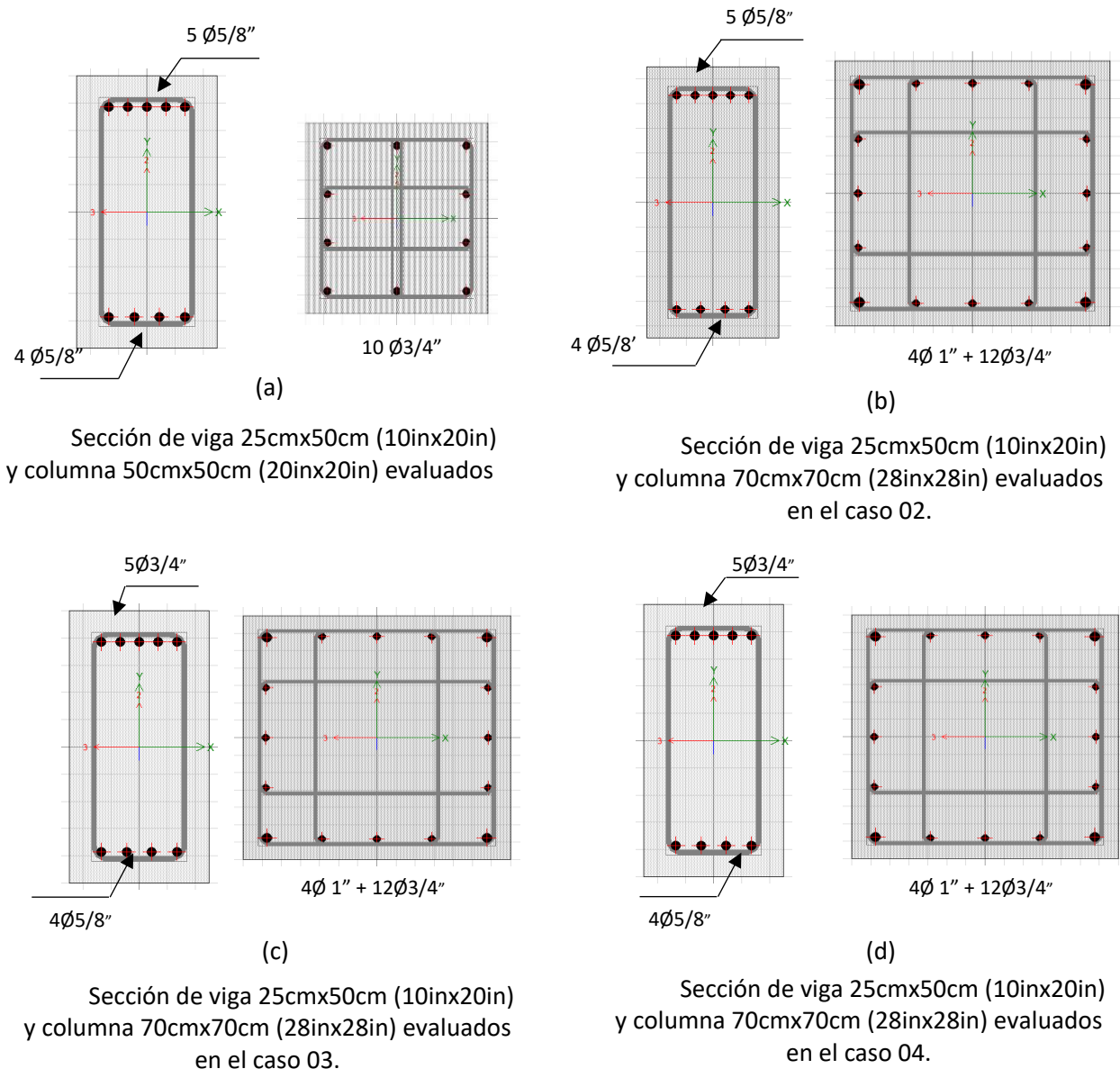


Figura 5. Secciones analizadas, (a) caso 01, (b) caso 02, (c) caso 03 y (d) caso 04.

Elaboración: Propia

Posteriormente, se definió las secciones finales mostrada en la figura 5 en el programa Etabs y se extrajo el diagrama momento curvatura positivo y negativo para la viga, así como de la columna con objetivo de idealizar los diagramas con el modelo bilineal usando el método de áreas iguales con un error inferior a 1% que permitió precisar las propiedades elásticas e inelásticas de estos elementos estructurales y por consiguiente definir las rótulas plásticas para ejecutar la técnica del análisis estático no lineal.

## RESULTADOS

### Diagrama momento – curvatura

De acuerdo con Aguiar (2003), emplea curvas bilineales para definir rangos inelásticos que defina y simplifique la obtención de respuesta de una estructura. Además, menciona que existen varios criterios para encontrar el modelo bilineal, uno de ellos es el criterio de iguales áreas, que cumple con la condición de que el área bajo la curva es igual al área bajo la curva del modelo bilineal.

Por otro lado, el área bajo la curva se puede calcular por la Regla de Simpson, en este método se sustituye la función por un polinomio de segundo grado. Al ser una curva suave y tratándose de una función, se puede integrar y buscar un sistema para que partiendo de las ordenadas y del intervalo de separación, se pueda calcular el área (Sánchez, 2016).

Para esta investigación, se utilizó el modelo bilineal para definir los valores de las relaciones constitutivas. Mediante ello, se obtuvo parámetros plásticos y elásticos para la técnica del Pushover.

#### Caso 01:

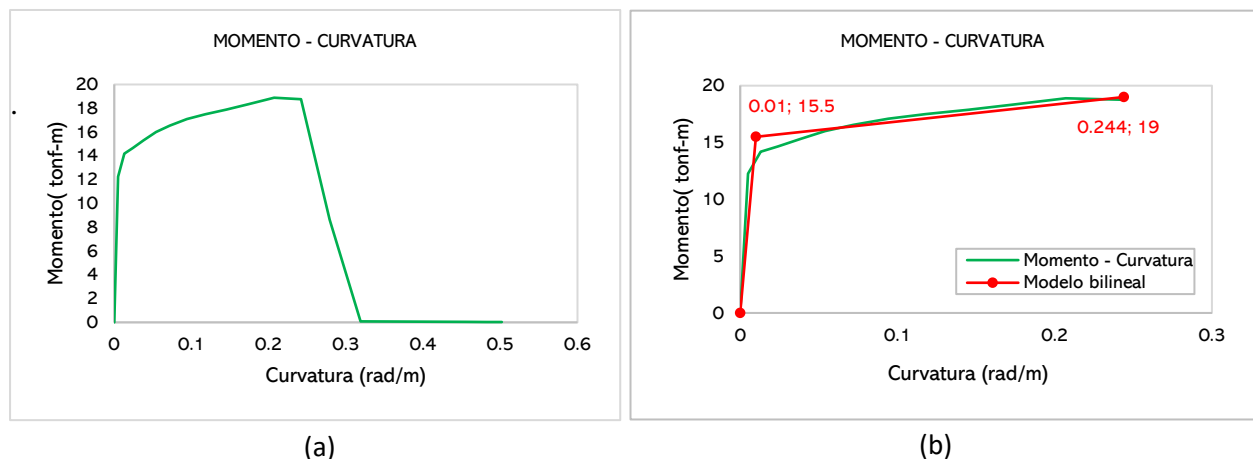


Figura 6. (a) Diagrama momento curvatura y (b) Diagrama momento curvatura idealizado positivo de la viga, caso 01.

*Elaboración: Propia*

En la figura 6(a) se presenta el diagrama Momento – Curvatura de la sección de viga evaluada para el caso 01 y mediante el modelo bilineal mostrado en la figura 18(b) que posee un momento de fluencia de 15.5 t·m (0.155 MN·m) con una curvatura de 0.01 rad/m y un momento último de 19 t·m (0.19 MN·m) con una curvatura de 0.244 rad/m.



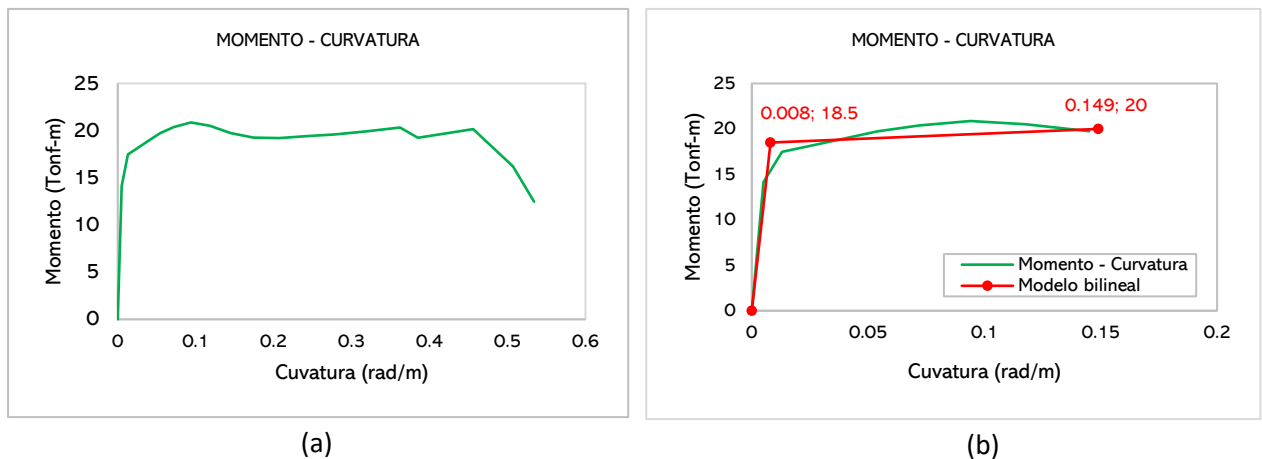


Figura 7. (a) Diagrama momento curvatura y (b) Diagrama momento curvatura idealizado negativo de la viga, caso 01.

*Elaboración: Propia*

El diagrama momento curvatura negativo de la viga posee un momento último superior al positivo, adicionalmente la curvatura última negativa es inferior al positivo como se observa en la figura 6 y 7. A pesar de que, el refuerzo longitudinal negativo tiene  $2 \text{ cm}^2$  ( $0.32 \text{ in}^2$ ) más de acero, la diferencia de momento – curvatura última no es significativa. Sin embargo, los valores negativos de fluencia son muy superiores con respecto a los valores positivos. De manera que, el refuerzo negativo posee un rango más extenso antes de iniciar la fluencia.

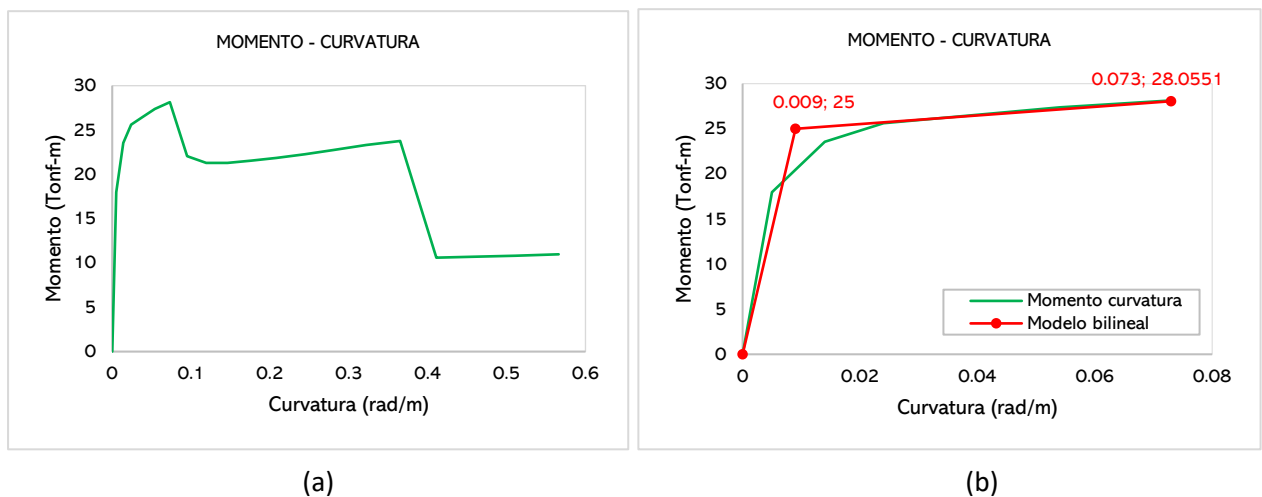


Figura 8. (a) Diagrama momento curvatura y (b) Diagrama momento curvatura idealizado de la columna, caso 01.

*Elaboración: Propia*

En diagrama momento curvatura de la columna mostrada en la figura 8(b) se puede notar un cambio brusco con respecto al de la viga, en especial el valor de la curvatura que no alcanza un rango tan amplio como la viga, pero si aumentó el momento último. Por lo tanto, se puede inferir que a mayor sea la sección de análisis esta tendrá una mayor resistencia a la flexión.

## Caso 02:

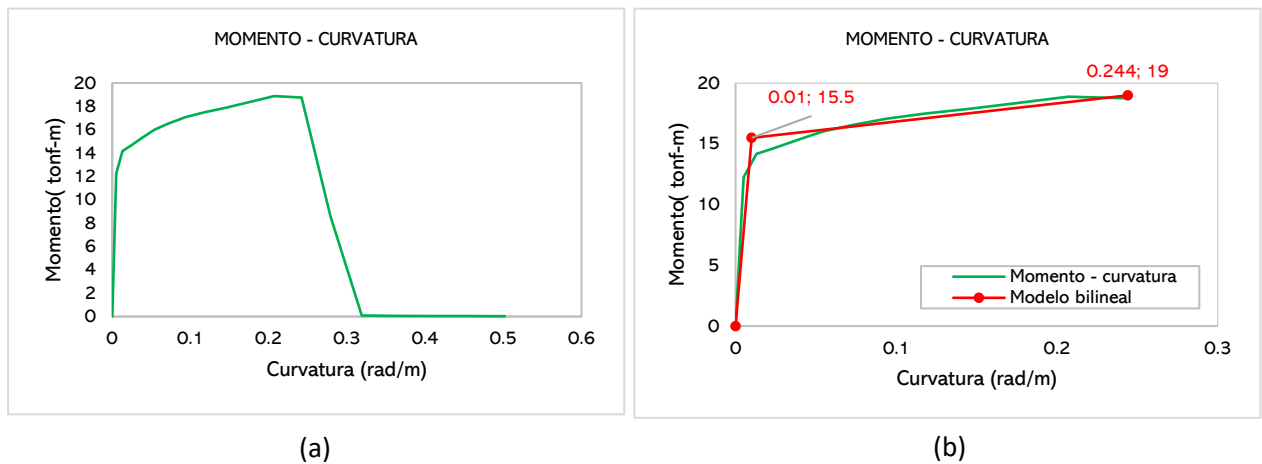


Figura 9. (a) Diagrama momento curvatura y (b) Diagrama momento curvatura positivo idealizado de la viga, caso 02.

*Elaboración: Propia*

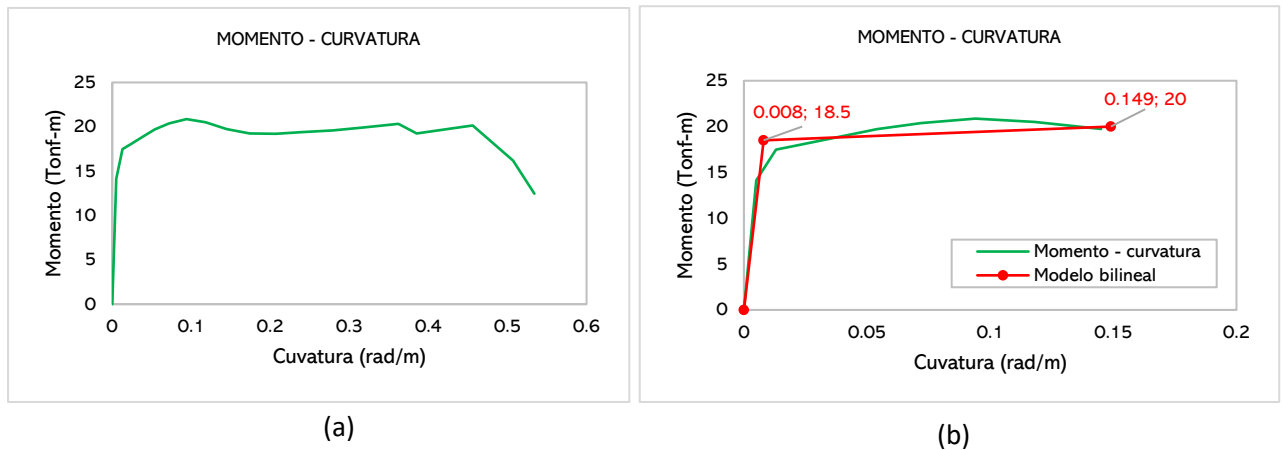


Figura 10. (a) Diagrama momento curvatura y (b) Diagrama momento curvatura negativo idealizado de la viga, caso 02.

*Elaboración: Propia*

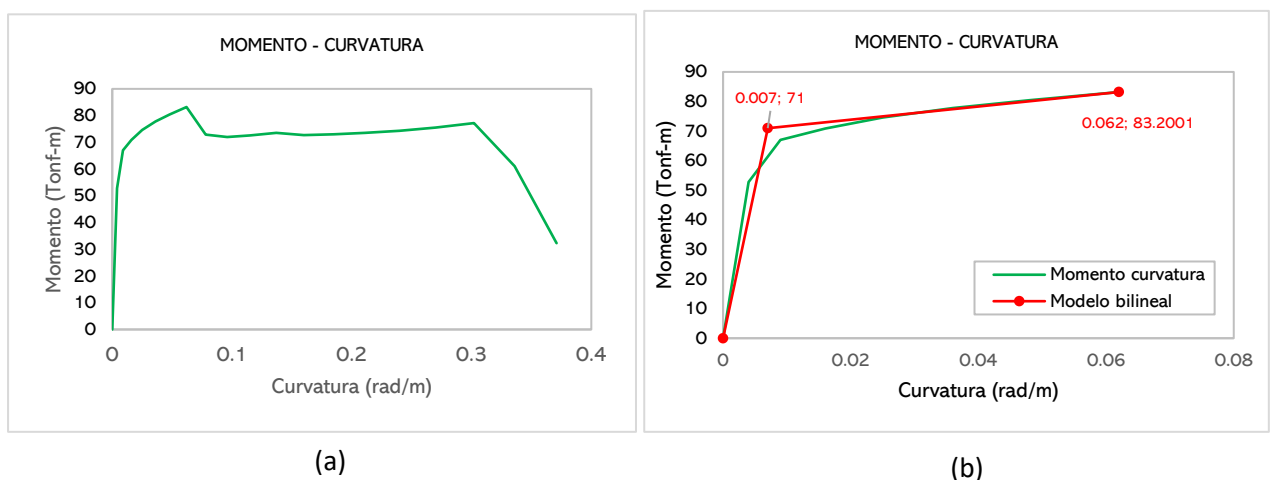


Figura 11. (a) Diagrama momento curvatura y (b) Diagrama momento curvatura idealizado de la columna, caso 02.

*Elaboración: Propia*

De la figura 9 y 10 se puede observar que, al analizar el área de la sección comprimida tiene mayor resistencia a la flexión esto no solo se debe al peralte de la viga si no también al área de acero colocado ya que, el ángulo de curvatura está en función de la distancia del extremo comprimido hacia el eje neutro y de la deformación unitaria, es decir a mayor sea el área de acero, menor será la distancia comprimida hacia el eje neutro.

Por otro lado, el diagrama de momento curvatura de la columna de análisis de la figura 11 tiene un incremento en el momento con respecto al caso 01, pero en curvatura ha disminuido, esto se debe al incremento de sección y área de acero.

### Caso 03:

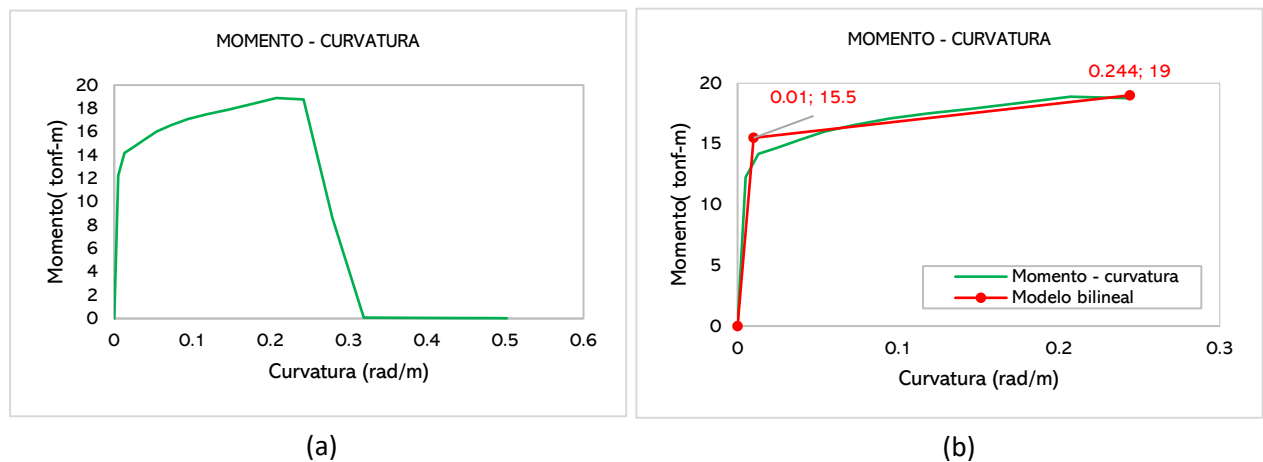


Figura 12. (a) Diagrama momento curvatura y (b) Diagrama momento curvatura positivo idealizado de la viga, caso 03.

*Elaboración: Propia*

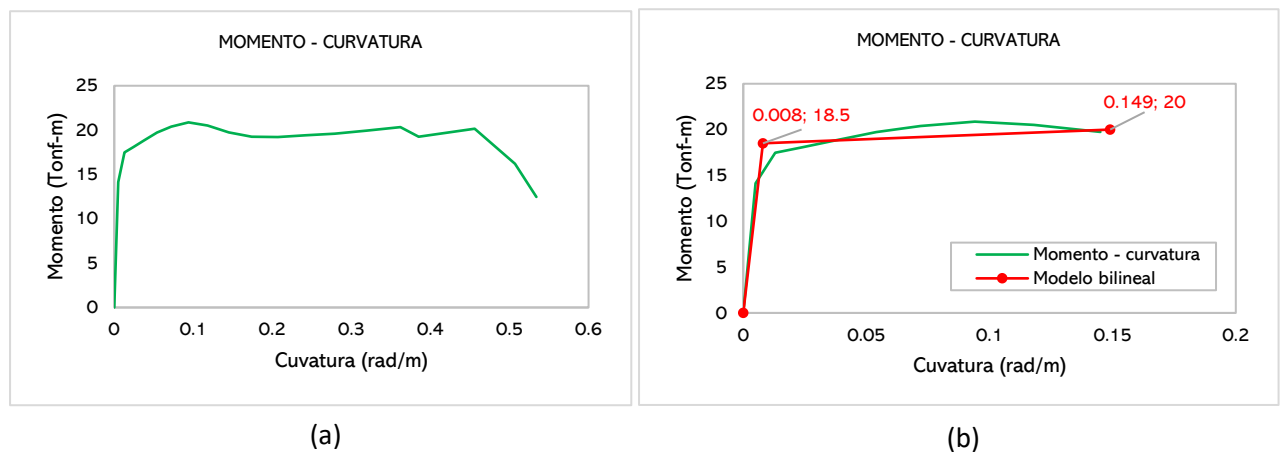
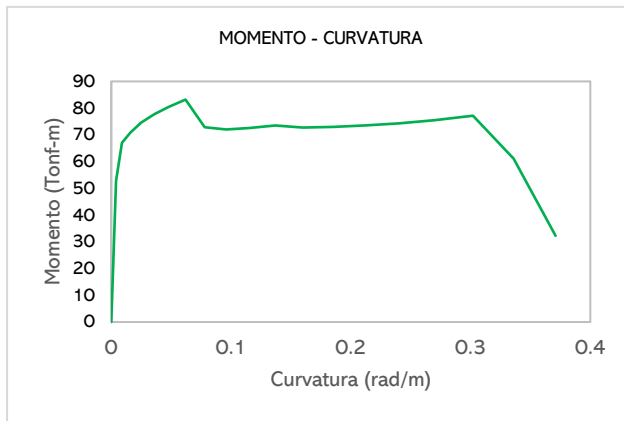
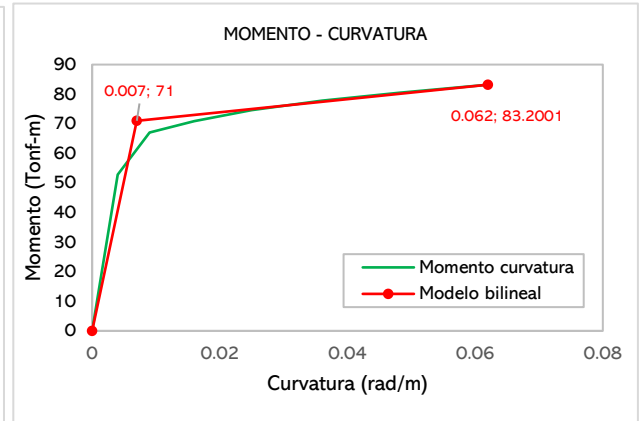


Figura 13. (a) Diagrama momento curvatura y (b) Diagrama momento curvatura negativo idealizado de la viga, caso 03.

*Elaboración: Propia*



(a)

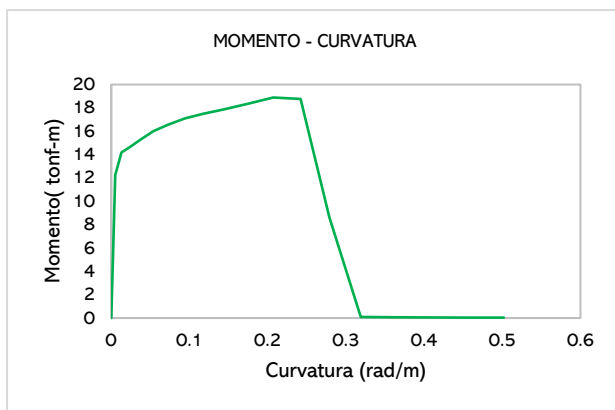


(b)

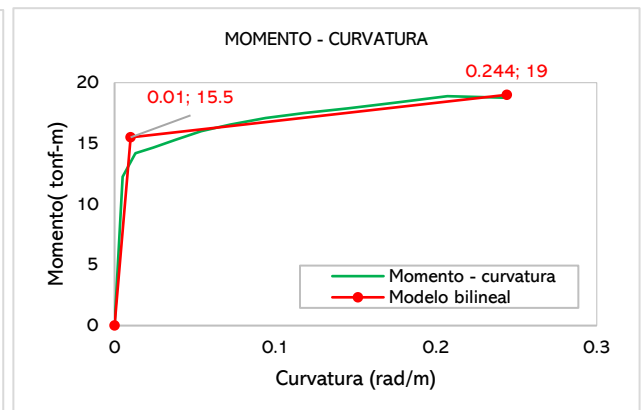
Figura 14. (a) Diagrama momento curvatura y (b) Diagrama momento curvatura idealizado de la columna, caso 03.

*Elaboración: Propia*

#### Caso 04:



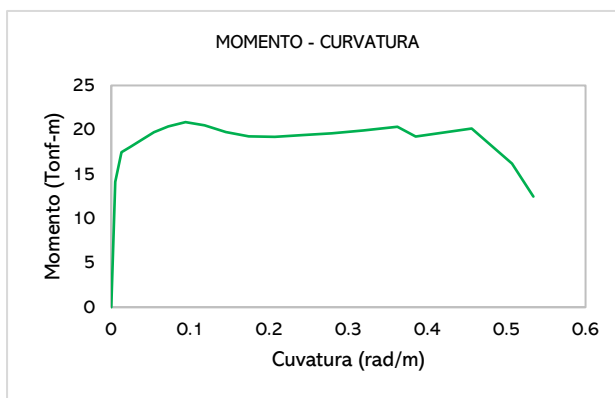
(a)



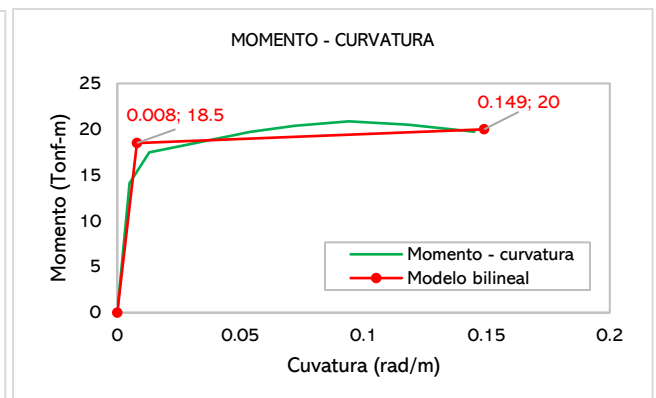
(b)

Figura 15. (a) Diagrama momento curvatura y (b) Diagrama momento curvatura positivo idealizado de la viga, caso 04.

*Elaboración: Propia*



(a)



(b)

Figura 16. (a) Diagrama momento curvatura y (b) Diagrama momento curvatura negativo idealizado de la viga, caso 04.

*Elaboración: Propia*

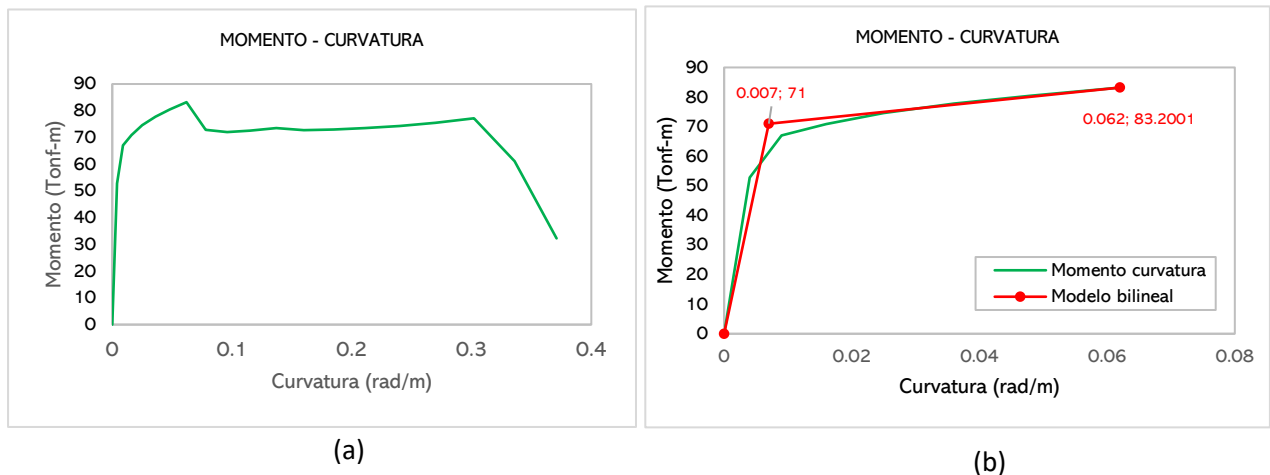


Figura 17. (a) Diagrama momento curvatura y (b) Diagrama momento curvatura idealizado de la columna, caso 04.

*Elaboración: Propia*

Cada sección analizada con excepción del caso 01, tienen el mismo comportamiento con respecto al momento y ángulo de curvatura, nótese en estas relaciones constitutivas que el comportamiento del área de sección comprimida de las vigas siempre tiene mayor resistencia a la flexión, pero menor ángulo de curvatura con respecto a la sección traccionada, esto se debe a que el área comprimida se encuentra más reforzada, por ello alcanza mayor resistencia a la flexión, mientras que el ángulo de curvatura se reduce conforme aumenta la distancia del borde superior de la sección de viga hacia el eje neutro (C), paralelamente sucede algo similar con las columnas la diferencia es que su análisis se da por direcciones. Sin embargo, un valor de momento alto garantiza una buena resistencia a la flexión, así mismo, una curvatura amplia garantiza mayor ductilidad al elemento gracias a la cantidad de acero colocado el cual son signos de un buen comportamiento mecánico.

Al analizar los diagramas momento curvatura se analizó el rango de ductilidad que posee cada sección evaluada de los casos de estudio. Ya que, a partir de ello se puede conocer la capacidad que tiene cada sección de incursionar en el rango inelástico. Además, aquellas relaciones constitutivas sirven para iniciar la técnica del Pushover. Es decir, sus valores plásticos son utilizados para definir las rótulas plásticas a flexión. Análogamente, es necesario destacar que no se han considerado rotulas plásticas de cortante en el análisis de los casos de estudio pues, de acuerdo con Inel (2006) la resistencia del concreto y la distribución de los estribos diseñados son suficientes para evitar la falla por esfuerzo cortante.

Con el modelo bilineal, se idealizó los diagramas de momento curvatura para obtener los valores de fluencia y valores plásticos que presenta cada sección analizada, ya que es necesario definir los valores de las rótulas plásticas para precisar el análisis estático no lineal, puesto que el programa utilizado como herramienta de modelo también define estas rótulas por defecto. Sin embargo, para esta investigación se definió estos valores con fines de precisar los resultados y poder obtener conclusiones objetivas.

### Cálculo del factor de reducción de fuerza sísmica:

Conviene mencionar que, analizar con teoría elástica significa que la rigidez del sistema nunca cambia por más que la estructura experimente desplazamientos considerables. Pero al considerar un modelo de análisis no lineal, la rigidez del sistema cambia de acuerdo con el nivel de deformación de la estructura. Es decir, la rigidez va disminuyendo conforme se deforma la estructura (Aguiar, 2007).

De acuerdo con Aguilar (2007), se utilizó el modelo bilineal para idealizar la curva de capacidad en un rango no lineal con el objetivo de obtener los parámetros últimos y de fluencia para calcular el factor de reducción de fuerza sísmica. Además, menciona que el ATC-19 (1995) considera que el factor  $R$  es igual al producto de 3 factores, factor de reducción por ductilidad ( $R_\mu$ ), factor de sobrerresistencia ( $R_\Omega$ ) y factor de redundancia ( $R_R$ ):

$$R = R_\mu \times R_\Omega \times R_R \quad (1)$$

Es de suma importancia mencionar que, gracias a los factores de reducción propuestos por primera vez por Veletsos y Newmark (1960) es posible proyectar edificios que tienen una respuesta no lineal aplicando herramientas de análisis lineal. Partiendo de aquella premisa, se han realizado numerosas investigaciones para validar y precisar la formulación de respuesta ( $R$ ), como in Berkeley (1980), ATC (1982), Freeman (1990), Uang (1991) y ATC (1995), otras formulaciones en las últimas décadas fueron anunciadas por Whittaker et al (1999) y Elnashai y Mwafy (2002). Sin embargo, Blanco (2018), concluye que la formulación más acertada para determinar el factor de reducción de las fuerzas sísmicas es la propuesta por la ATC-19 (1995) ya que introduce el factor de redundancia y excluye el factor de amortiguamiento, debido a que este factor no debe usarse para reducir proporcionalmente las demandas de fuerza. Siendo este el motivo por el cual se emplea la relación de respuesta ( $R$ ) propuesta por el ATC-19 (1995) para cuantificar el factor de reducción de fuerza sísmica ( $R$ ) en esta investigación.

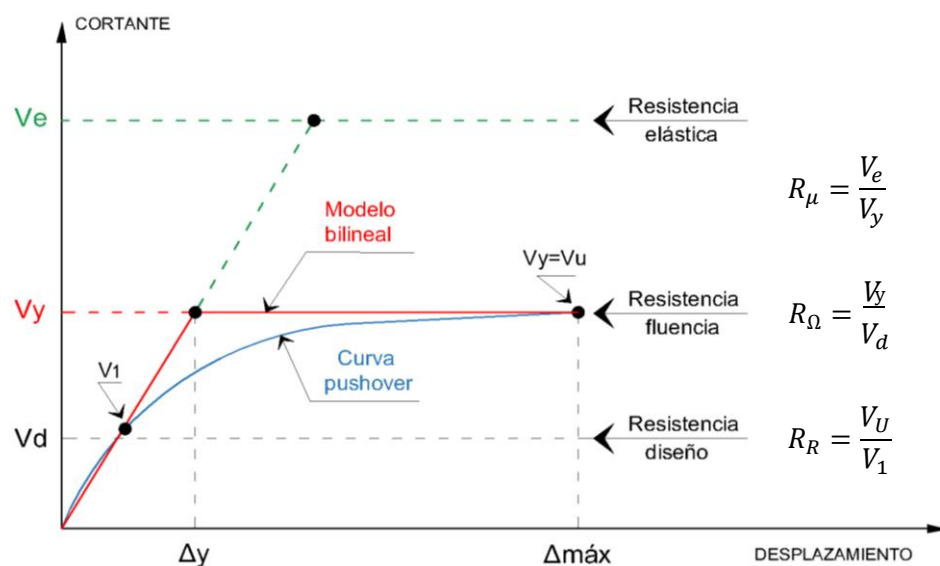


Figura 18. Representación de la curva de capacidad idealizada.

Elaboración: Propia

En la figura 18, se representa una curva de capacidad, también conocida como curva Pushover, con el objetivo de idealizar los parámetros que inducen a los 3 factores (Factor de reducción por ductilidad, factor de sobrerresistencia y factor de redundancia) que gobiernan el factor de reducción de fuerza sísmica  $R$  según el ATC-19 (1995). Adicionalmente, más adelante se explicará en que consiste cada factor y parámetro descrito en esta figura.

Daza (2003), define el factor de reducción por ductilidad  $R_\mu$  como la relación de la carga elástica que puede resistir una estructura entre la carga inelástica que puede resistir esa misma estructura si y solo si tuviese un comportamiento inelástico. Además, de acuerdo con Loayza (2021) es el factor que reduce la demanda de fuerza elástica que llega a la edificación a un nivel de máximo de esfuerzo de cedencia en la estructura:

$$R_\mu = \frac{V_e}{V_y} \quad (2)$$

El factor de sobrerresistencia  $R_\Omega$  se define como la relación de la carga inelástica (previo a alcanzar cualquier estado límite) entre la carga de cortante basal de diseño (Loayza, 2021). Generalmente la resistencia lateral máxima de un edificio suele ser mayor que la resistencia lateral de diseño. Es decir, existe una reserva de resistencia (sobrerresistencia) en toda estructura, entonces este factor reduce aquella demanda, para ello es importante el análisis computacional que permite tener valores más precisos a la realidad (Daza, 2003):

$$R_\Omega = \frac{V_y}{V_d} \quad (3)$$

En 2016, Tena menciona que la redundancia se refiere a la existencia de una gran cantidad de líneas de defensa continuas y resistentes a una carga, que causa un alto grado de hiperestaticidad. Además, afirma que se debe considerar la redundancia desde el punto de vista de diseño sísmico, ya que cuando se cuenta con un número reducido de elementos de apoyo, la falla de alguno de estos puede causar el colapso total de la estructura. No obstante, ante una carga lateral se puede interpretar como el número de regiones críticas, llamadas articulaciones plásticas, necesarias para causar la inestabilidad o colapso de la estructura.

Aguiar (2007), define el factor de redundancia como la capacidad de incursionar la estructura en el rango no lineal. Es decir, la capacidad de una estructura en redistribuir las cargas de los elementos con mayor solicitud a los elementos de menor demanda. Para este caso se plantea calcular el factor de redundancia ( $R_R$ ) aplicando la expresión de Tsopelas y Husain (2004) donde define la relación, como la cortante basal máxima con respecto al cortante basal cuando se forma la primera articulación plástica, teniendo como condición que el factor de redundancia siempre será mayor a la unidad:

$$R_R = \frac{V_U}{V_1} \quad (4)$$

Es conveniente, añadir que la primera articulación plástica se presenta cuando existe redistribución en la rigidez que se puede apreciar en la curva de capacidad al realizar la técnica Pushover, pues de acuerdo con Rodríguez (2005) el Análisis estático no lineal (AENL) consiste en que primero actúan las cargas gravitacionales en la estructura produciéndose las primeras deformaciones, luego pasan a actuar las cargas laterales que se incrementan, paso a paso, en

una dirección hasta que se forma la primera rótula plástica y se presenta una redistribución de rigidez de la estructura, y así prosigue un proceso iterativo hasta que la estructura falla totalmente. Es decir, cuando la curva de capacidad presenta una menor pendiente significativa con respecto a la pendiente que se tiene antes de la post fluencia, entonces se inicia una redistribución decreciente de la rigidez de la estructura formándose la primera rótula plástica.

### Curvas de capacidad – Pushover:

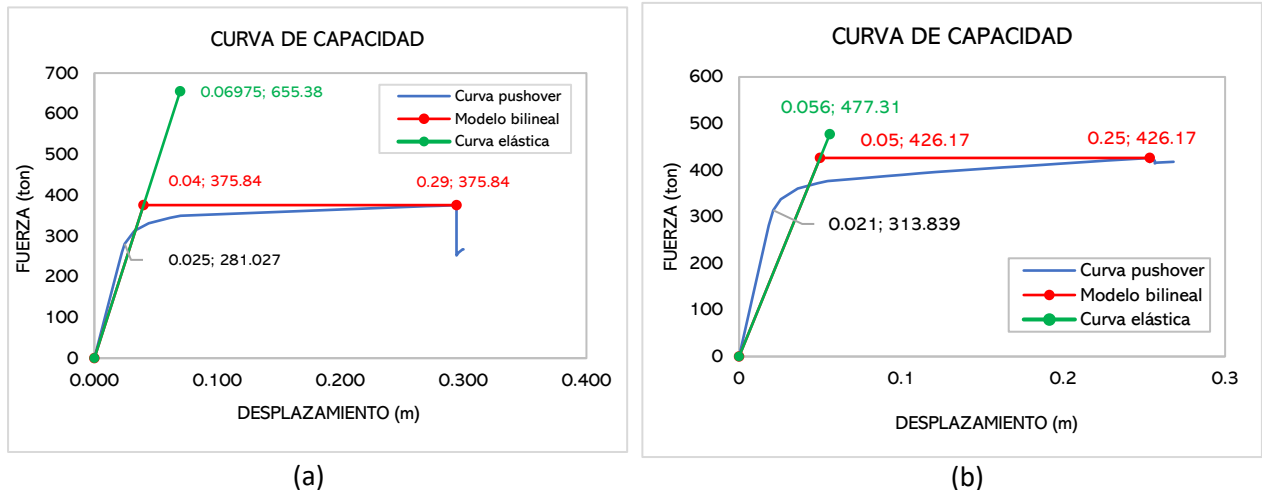


Figura 19. (a) Curva de capacidad idealizada en dirección x-x y (b). Curva de capacidad idealizada Caso 01.

*Elaboración: Propia*

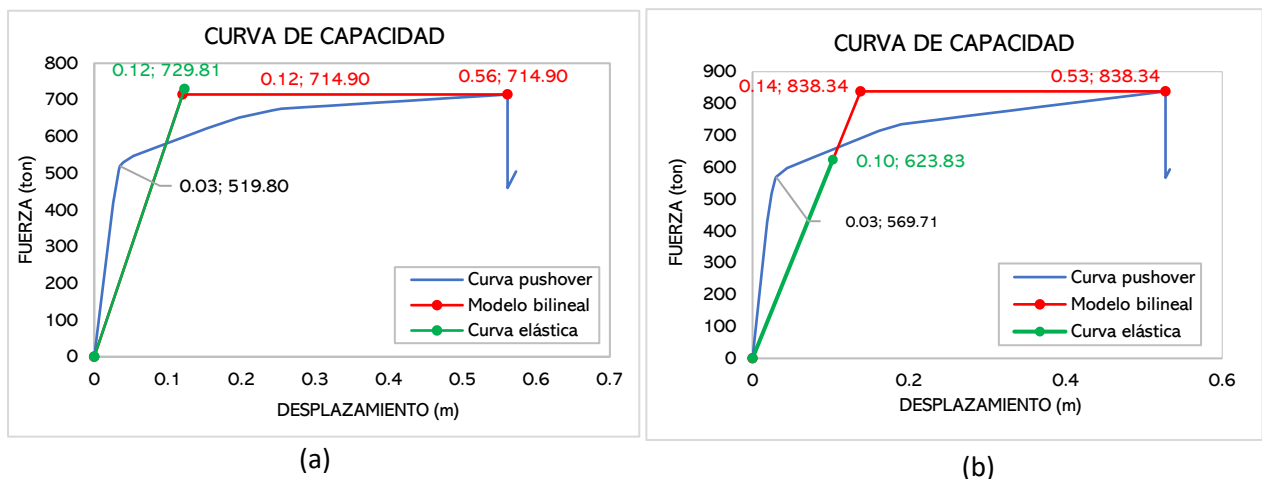


Figura 20. (a) Curva de capacidad idealizada en dirección x-x y (b) Curva de capacidad idealizada Caso 02.

*Elaboración: Propia*



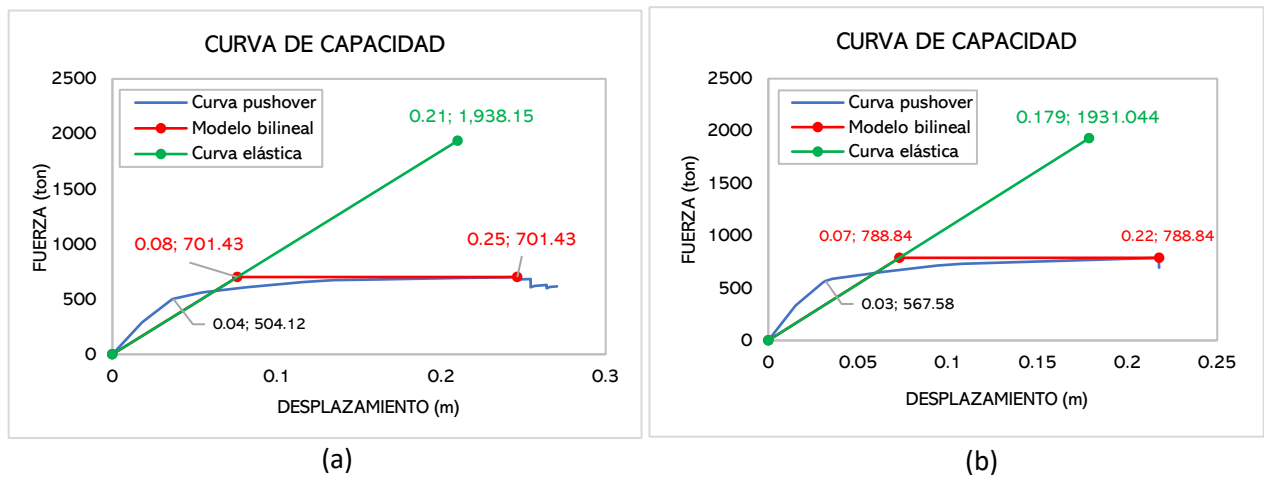


Figura 21. (a) Curva de capacidad idealizada en dirección x-x y (b) Curva de capacidad idealizada Caso 03.

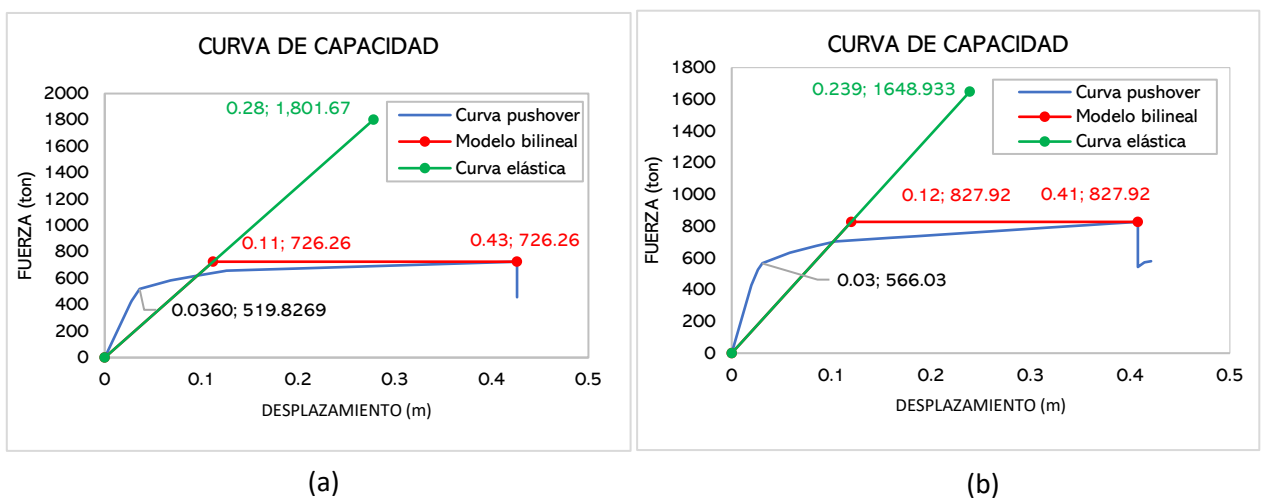


Figura 22. (a) Curva de capacidad idealizada en dirección x-x y (b) Curva de capacidad idealizada Caso 04.

*Elaboración: Propia*

La curva de capacidad del caso 01 (figura 19) da a conocer factores de reducción en ambas direcciones, en la dirección x-x se tiene el mayor parámetro de ductilidad ( $R_\mu$ ), pero menor sobrerresistencia ( $R_\Omega$ ) y redundancia ( $R_R$ ) con respecto a la dirección y-y. Por lo tanto, se espera una respuesta de factor de reducción de fuerza sísmica mayor en dirección x-x, esto se debe a la gran magnitud del ( $R_\mu$ ) con respecto al otro eje.

La curva Pushover del caso 02 (figura 20) en la dirección y-y también tiene factores de reducción superiores con respecto a la dirección x-x. Sin embargo, la resistencia elástica en la dirección y-y es menor a la resistencia inelástica, es decir el comportamiento plástico ocurre más rápido en esta dirección provocando una disminución del factor de reducción por ductilidad. Por lo tanto, para este análisis se espera un mayor factor de reducción de fuerza sísmica en dirección x-x, el cual se detallará más adelante.

Del caso 03, se puede observar en las curvas de capacidad (figura 21) que se tienen valores aproximados para ambas direcciones, en dirección x-x se tiene mayor factor de ductilidad, pero menor factor de sobrerresistencia y redundancia con respecto a la dirección y-y. Para este caso, también se espera una mayor respuesta R en la dirección x-x, esto se debe al ( $R_\mu$ ), el cual es muy superior y a pesar de que en la otra dirección los valores de sobrerresistencia y

redundancia son mayores, el factor por ductilidad resulta más predominante en dirección x-x, el cual provoca una mayor demanda de respuesta R.

En la figura 22, se visualiza que sus resultados inducen a una respuesta mayor en la dirección x-x como en todos los casos. Sin embargo, en la dirección y-y se observa que los valores de sobrerresistencia y redundancia son mayores al igual que en todos los casos de estudio, el cual implica que estos parámetros siempre tendrán mayor demanda en la dirección con más ejes de columnas. Por otro lado, al obtener todas las curvas de capacidad para cada caso de estudio se observa que en la dirección x-x siempre se presenta una mayor respuesta por ductilidad el cual resulta muy significativo ya que en este eje se presenta el menor número de arriostres verticales.

### Variables independientes – factor de reducción de fuerza sísmica R:

Por lo tanto, se obtiene los siguientes resultados de factor de reducción de fuerza sísmica (R) :

Tabla 2. Resultados caso 01

*Elaboración: Propia*

FACTOR DE REDUCCIÓN		
Factor	Rx	Ry
$R_{\mu}$	1.74	1.12
$R_{\Omega}$	3.30	3.75
RR	1.34	1.36
<b>R</b>	<b>7.70</b>	<b>5.70</b>

Del caso 01 compuesta por 3 niveles de pisos se obtiene para Rx=7.70 y para Ry=5.70.

Tabla 3. Resultados caso 02

*Elaboración: Propia*

FACTOR DE REDUCCIÓN		
Factor	Rx	Ry
$R_{\mu}$	1.02	0.74
$R_{\Omega}$	4.88	5.72
RR	1.38	1.47
<b>R</b>	<b>6.85</b>	<b>6.27</b>

Del caso 02 compuesta por 6 niveles de pisos se obtiene para Rx=6.85 y para Ry=5.96.

Tabla 4. Resultados caso 03

*Elaboración: Propia*

FACTOR DE REDUCCIÓN		
Factor	Rx	Ry
$R_{\mu}$	1.94	1.48
$R_{\Omega}$	5.30	6.04
RR	1.40	1.46
<b>R</b>	<b>14.36</b>	<b>13.02</b>

Del caso 03 compuesta por 9 niveles de pisos se obtiene para Rx=14.36 y para Ry=13.02.

Tabla 5. Resultados caso 04

*Elaboración: Propia*

FACTOR DE REDUCCIÓN		
Factor	Rx	Ry
$R_{\mu}$	2.48	1.99
$R_{\Omega}$	4.43	5.05
RR	1.40	1.46
<b>R</b>	<b>15.35</b>	<b>14.70</b>

Del caso 04 compuesta por 12 niveles de pisos se obtiene para Rx=15.35 y para Ry=14.70.

De los datos procesados, se obtuvo los factores de reducción de fuerza sísmica ( $R$ ) para los 4 casos de estudio que se muestran en la Tabla 2, 3, 4 y 5. Conviene especificar que, estos resultados están relacionados con propiedades dinámicas de la estructura, por tanto, se puede considerar varios factores que inciden en este valor. Sin embargo, uno de los parámetros dinámicos y de diseño en una estructura es el periodo ( $T$ ) que está en función de la frecuencia circular que depende de la masa y rigidez del elemento estudiado pues, Zhai (2015) concluye que, el factor de reducción de fuerza sísmica depende mucho del periodo. Así mismo, Aguiar (2007) estudia y concluye que este factor está en función no solo del periodo, sino también de la deriva máxima de entrepiso, partiendo de este estudio se continuará evaluando esta relación entre periodo y factor  $R$  para el sistema estructural aporticado de concreto armado ya que es esencial para poder comprender más estos parámetros que gobiernan el factor  $R$  y ver la influencia que tiene sobre ellos y/o factores importantes de esta tipología estructural.

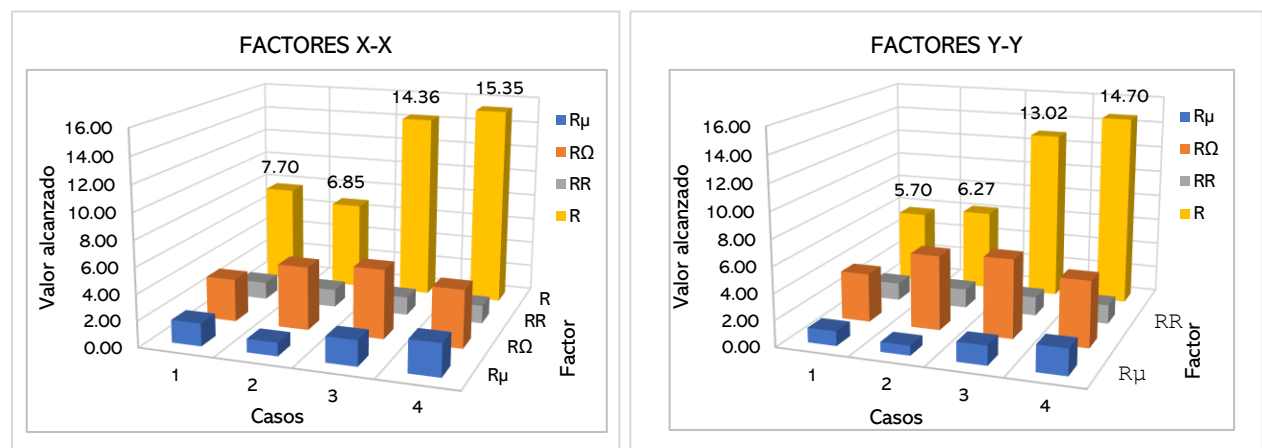


Figura 23. Representación de factores por ductilidad ( $R_\mu$ ), sobrerresistencia ( $R_\Omega$ ), redundancia ( $RR$ ) y reducción ( $R$ ).

*Elaboración: Propia*

De los resultados obtenidos en la tabla 2, 3, 4 y 5 es necesario matizar que, el factor de ductilidad ( $R_\mu$ ) es variable de acuerdo con la resistencia elástica, es decir, se muestra diferente según la demanda elástica a reducir independientemente del análisis de dirección. Ahora, con respecto al factor de sobrerresistencia ( $R_\Omega$ ) se puede apreciar que es el valor más significativo por sobresalir entre los demás factores, esto se debe a la reserva de resistencia que presenta una estructura, en este caso el factor ( $R_\Omega$ ) es mayor en la dirección y-y debido a que el grado de hiperestaticidad es mayor en este eje, es decir que el factor de sobrerresistencia depende proporcionalmente de la redundancia estructural. Esta premisa nos lleva a entender la razón por la cual las respuestas ( $R$ ) son distintas para ambas direcciones pues, de forma general se espera una mayor respuesta en la dirección que presente mayor redundancia y sobrerresistencia estructural. Sin embargo, este comportamiento está sujeto al factor por ductilidad que puede variar según la demanda elástica (figura 23).

Por otro lado, al correlacionar estos resultados con la Norma Técnica Peruana (NTP) E.030, se encuentra algunas discrepancias, ya que el código peruano establece factores de reducción de fuerza sísmica ( $R$ ) en sistemas pórticos de concreto armado en función de la tipología estructural, es decir, que proporciona el mismo factor ( $R$ ) si en ambas direcciones de análisis se trata del mismo sistema estructural. Siendo esta una incompatibilidad con los resultados obtenidos en esta investigación pues, como se observó en los resultados la respuesta ( $R$ ) es diferente para cada dirección de análisis debido a la sobrerresistencia y redundancia estructural.

### Evaluación del factor de ductilidad $R_\mu$ en función al periodo T:

A modo de evaluar, se idealiza representaciones gráficas que relaciona el periodo con los parámetros que inducen al factor de reducción de fuerza sísmica ( $R$ ) de los 4 casos de estudio:

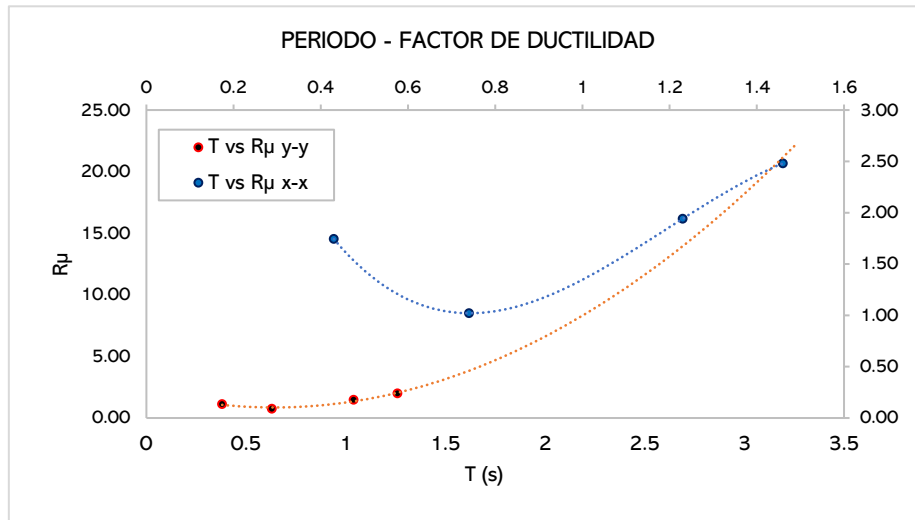


Figura 24. Representación del periodo vs el factor de ductilidad  
*Elaboración: Propia*

De la figura 24, podemos deducir que el factor de ductilidad en estructuras de concreto armado en sistemas pórticos varía para distintos intervalos de periodo y los valores obtenidos son distintos en cada dirección de análisis. Es necesario matizar que, en dirección x-x se tiene mayor demanda por ductilidad en amplios intervalos de periodo sobre todo a partir del periodo 0.74, en cambio en dirección y-y se tiene menor ductilidad en intervalos de periodos muy cortos. Por otro lado, inicialmente se presenta mayor ductilidad en x-x pero conforme la deriva aumenta el factor por ductilidad también crece a partir del periodo 0.63.

### Evaluación del factor de sobrerresistencia $R_\Omega$ en función al periodo T:

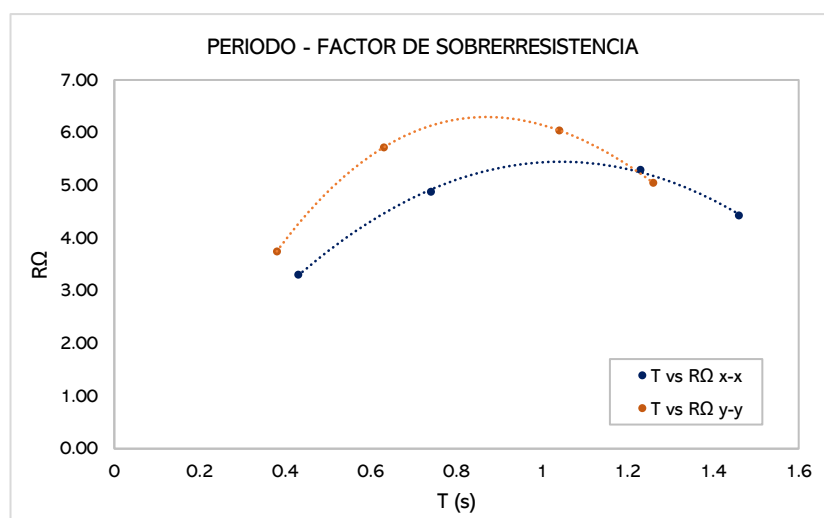


Figura 25. Representación del periodo vs el factor de sobrerresistencia

*Elaboración: Propia*

En cuanto a la relación del periodo y el factor de sobrerresistencia (figura 25) podemos observar para la dirección y-y se presenta mayores valores de sobrerresistencia, pero a partir del caso 03 este empieza a descender, esta misma característica se presenta también en la dirección x-x. Por tanto, se puede deducir para esta investigación que el factor de sobrerresistencia se incrementa en un intervalo de periodo comprendido en 0.43 – 1.23 para la dirección x-x y 0.38 – 1.04 para y-y.

Por otro lado, se puede apreciar que en un momento la curva x-x se aproxima a la curva y-y, pero esto se debe a que la dirección x-x presenta mayor sobrerresistencia en periodos más cortos, en cambio en dirección y-y se aprecia valores menores de  $R\Omega$  en periodos más amplios y al descender llega a intersectarse con la curva y-y manteniéndose en un periodo más prolongado.

### Evaluación del factor de redundancia $R_R$ en función al periodo $T$ :

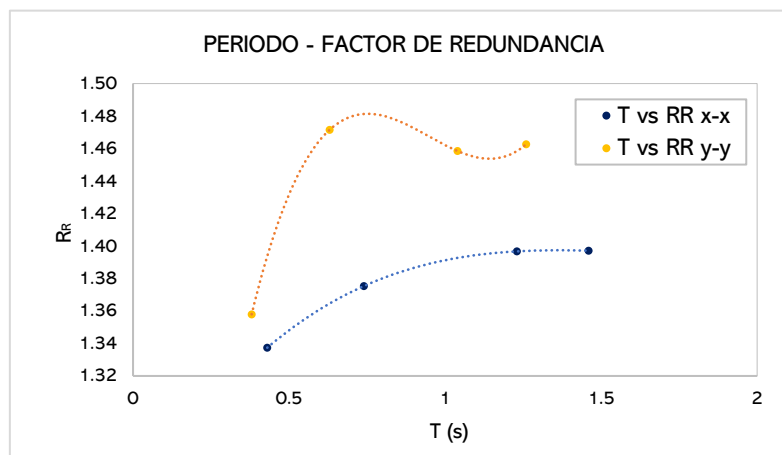


Figura 26. Representación del periodo vs el factor de redundancia

*Elaboración: Propia*

En la dirección y-y se presenta mayor redundancia estructural, esto era de esperarse ya que en este eje se tiene el mayor número de columnas. Por otro lado, se aprecia que en ambas direcciones el factor de redundancia ( $R_R$ ) es proporcional al periodo y es posible establecer valores mediante una ecuación (figura 26). Sin embargo, este no es objetivo de esta investigación, pero es de suma importancia mencionar que, el  $R_R$  está en función del periodo. Conviene mencionar que, el factor de redundancia depende de otros parámetros pues, El comentario a la Reducción Nacional del Riesgo de Terremotos Programa (NEHRP) Disposiciones recomendadas (FEMA 369) indica que el factor de redundancia depende de varios factores como la demanda y/o capacidad del elemento, tipos de mecanismos que pueden formarse, las características individuales de los sistemas de construcción y materiales, altura del edificio, número de pisos, irregularidad, resistencia a la torsión, cuerda y la longitud del colector, los tramos del diafragma, el número de líneas de resistencia y el número de elementos por línea son todos importantes e influirán intrínsecamente en el nivel de redundancia en los sistemas y su fiabilidad.

### Evaluación del factor de reducción de fuerza sísmica $R$ en función del periodo ( $T$ ):

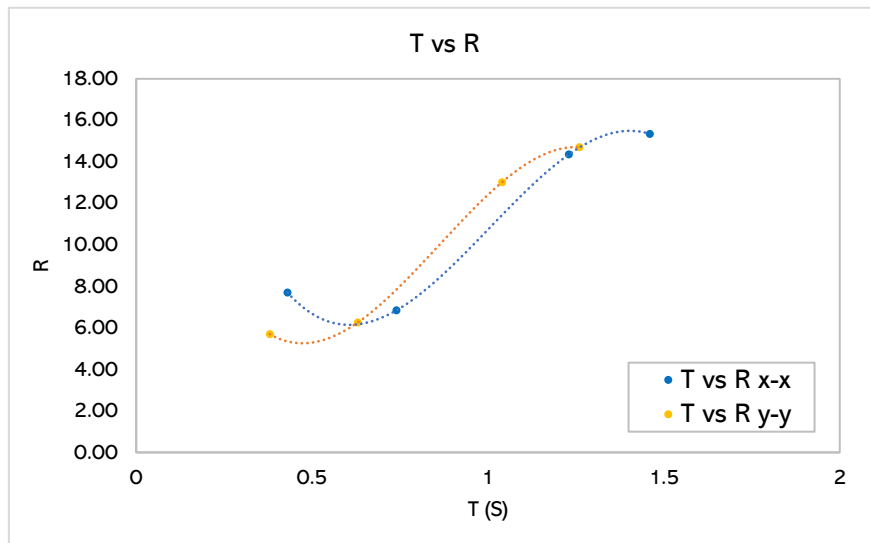


Figura 27. Representación del periodo vs el factor de reducción de fuerza sísmica ( $R$ )

*Elaboración: Propia*

De acuerdo con Zhai (2015), es posible asociar el factor de reducción de fuerza sísmica con el periodo, entonces de la figura 27 la respuesta mayor del factor  $R$  es alcanzada en la dirección  $x-x$ , además en un intervalo de periodo comprendido en  $0.74 - 1.23$  el factor  $R$  se muestra en incremento constante y lineal en dirección  $x-x$  pues, se recomienda solo para este caso la interpolación lineal en dicho intervalo para obtener valores de  $R$ . Así mismo, se tiene un comportamiento similar en dirección  $y-y$  en un intervalo de periodo comprendido en  $0.63 - 1.04$  de manera que es posible aplicar en ese caso artificios lineales para obtener respuestas rápidas de respuesta  $R$ .

Adicionalmente, el comentario a la Reducción Nacional del Riesgo de Terremotos Programa (NEHRP) Disposiciones recomendadas (FEMA 369) recomienda que los valores de  $R$  deben ser elegidos y utilizados con un juicio cuidadoso. Por ejemplo, se deben utilizar valores más bajos para estructuras que poseen un bajo grado de redundancia donde todas las bisagras plásticas requeridas para la formación de un mecanismo puedan formarse esencialmente de forma simultánea y a un nivel de fuerza cercano a la resistencia de diseño especificada. Teniendo en cuenta los antecedentes y recomendaciones podemos afirmar que, el factor  $R$  no solo depende del periodo sino también de la deriva máxima y el grado de redundancia estructural, por ello es pertinente evaluar estos dos casos.

### Evaluación del factor de ductilidad $R_\mu$ en función a la deriva máxima:

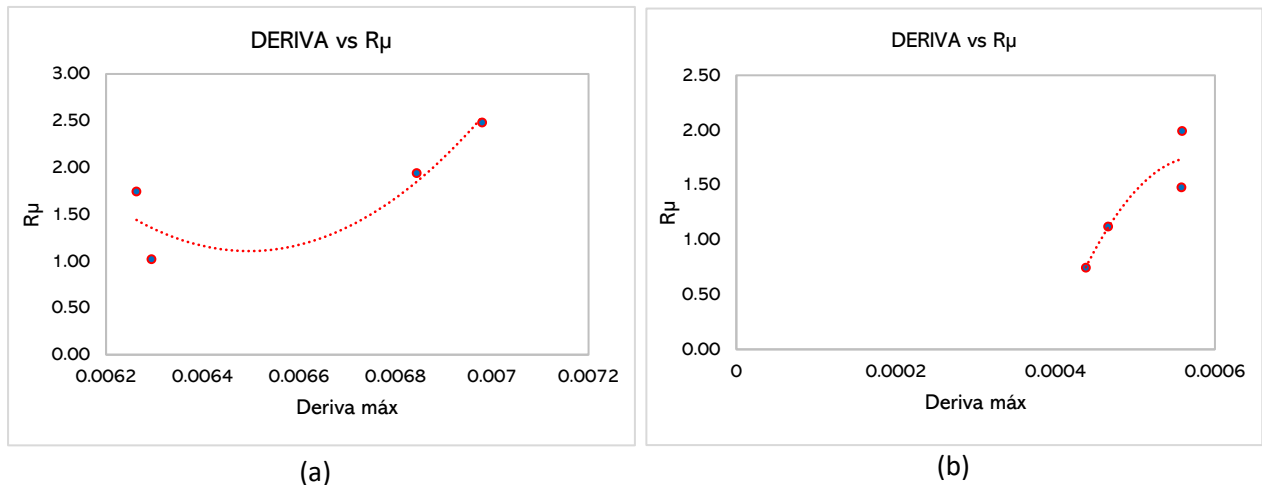


Figura 28. Representación del Deriva máxima vs el factor de ductilidad en (a) dirección x-x y (b) dirección y-y

*Elaboración: Propia*

Al analizar el factor de ductilidad en ambas direcciones de la figura 28 podemos deducir que el factor no es constante en ningún intervalo de deriva. Sin embargo, en dirección x-x el intervalo de deriva 0.00629 – 0.00698 donde se aproxima al valor 0.007 normado por la E.030 el factor por ductilidad crece, así mismo, en dirección y-y cuando el valor se aproxima al valor normado el factor por ductilidad decrece. Cabe resaltar que estas derivas son distorsiones inelásticas máximas de los casos de estudio, en función a ello se considera este análisis por dirección.

### Evaluación del factor de sobrerresistencia $R_\Omega$ en función a la deriva máxima:

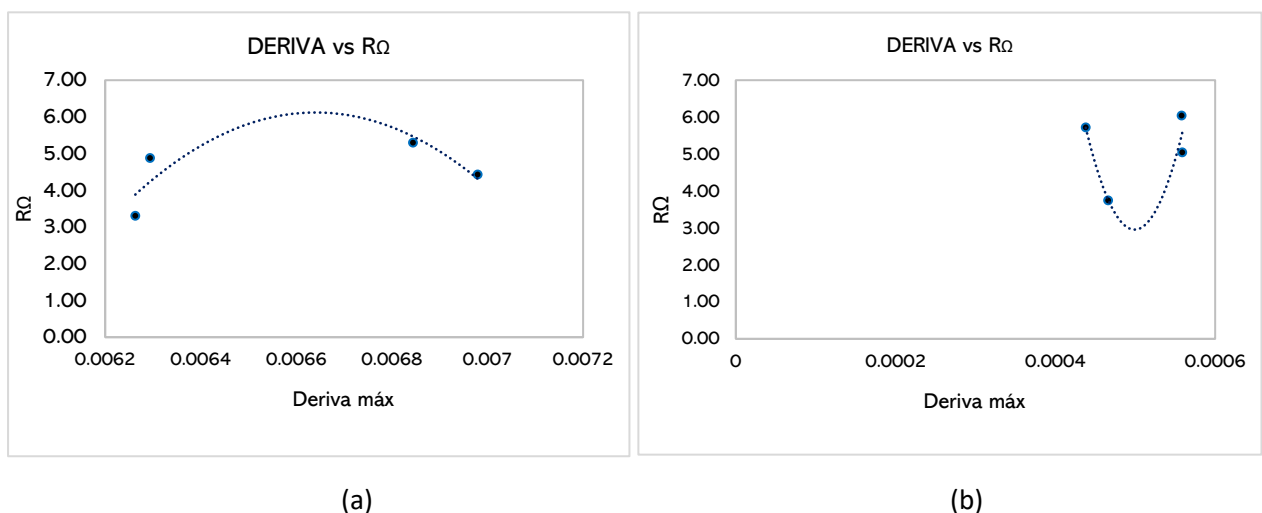


Figura 29. Representación de la Deriva máxima vs el factor de sobrerresistencia en (a) dirección x-x y (b) dirección y-y

*Elaboración: Propia*

En cuanto al factor de sobrerresistencia ( $R\Omega$ ), es necesario especificar que, en la dirección x-x el factor de sobrerresistencia aumenta ampliamente hasta la deriva 0.0066 pero a partir de este valor empieza a decrecer proporcionalmente. Por otro lado, en la dirección y-y (figura 29) el factor de sobrerresistencia es variable en todos los intervalos de deriva. Por tanto, no es posible definir una relación exacta entre deriva máxima y  $R\Omega$  en sistema estructural aporticado de concreto armado.

#### Evaluación del factor de redundancia $R_R$ en función a la deriva máxima:

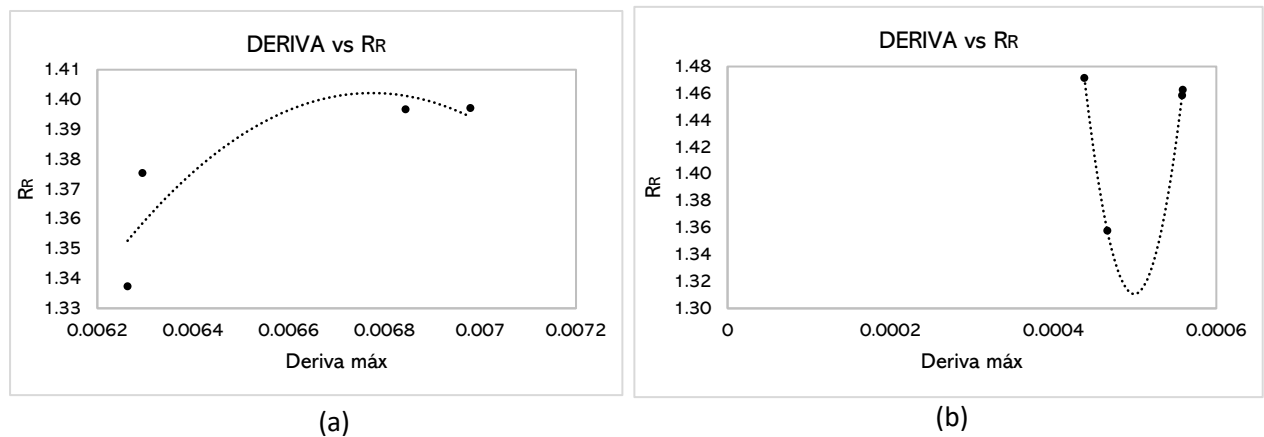


Figura 30. Representación del Deriva máxima vs el factor de redundancia en (a) dirección x-x y (b) dirección y-y

*Elaboración: Propia*

El factor de redundancia presenta valores variables con respecto a las derivas máximas inelásticas. Sin embargo, se aprecia que este parámetro disminuye a partir de la deriva 0.0068 para la dirección x-x, pero en y-y presenta valores muy inestables. Por tanto, no es posible establecer una relación exacta para este caso (figura 30).

#### Evaluación del factor de reducción de fuerza sísmica ( $R$ ) en función a la deriva máxima:

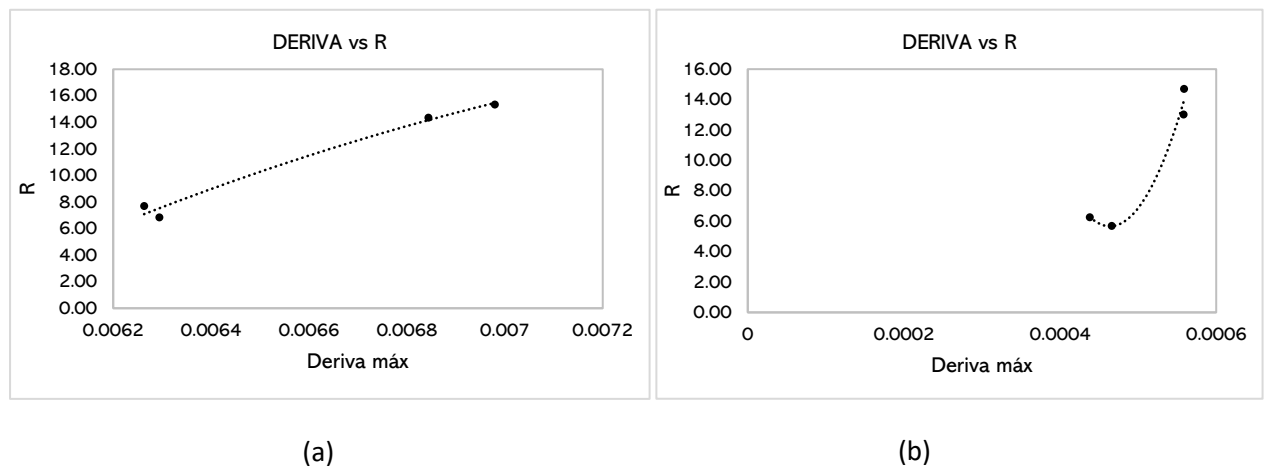


Figura 31. Representación del Deriva máxima vs el factor de reducción de fuerza sísmica  $R$ . (a) Dirección x-x y (b) dirección y-y

*Elaboración: Propia*



El factor de reducción de fuerza sísmica  $R$  en dirección x-x aumenta conforme la deriva se incrementa en intervalos amplios de deriva, en la dirección y-y ocurre algo similar. Sin embargo, en esta dirección se observa que el factor  $R$  aumenta en función de la deriva en intervalos de deriva muy cortos. Por lo tanto, se afirma que el factor de reducción de fuerza sísmica es directamente proporcional a la deriva máxima inelástica (figura 31).

### Evaluación del factor de redundancia $R_R$ en función al factor de reducción de fuerza sísmica $R$ :

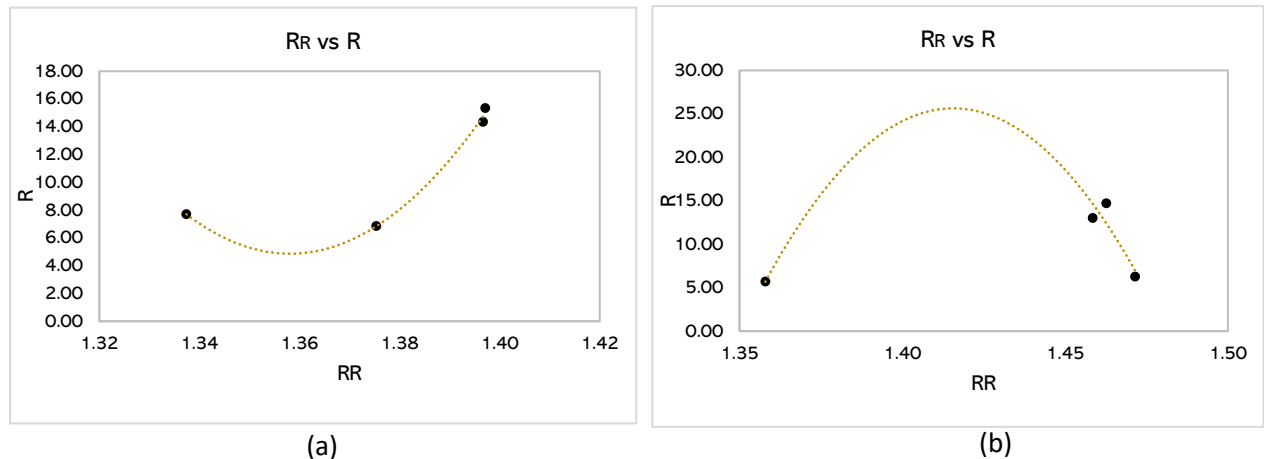


Figura 32. Representación del factor de redundancia vs el factor de reducción de fuerza sísmica  $R$ .  
(a) Dirección x-x y (b) dirección y-y

*Elaboración: Propia*

Dado que, el factor de redundancia está asociado a dos variables (cortante última y cortante donde se forma la primera rótula plástica), podemos relacionar otros parámetros como rigidez y desplazamiento de la estructura, el cual implica que las dimensiones y altura de la edificación sean factores importantes a considerar pues, de acuerdo a lo mencionado en el comentario a la Reducción Nacional del Riesgo de Terremotos Programa (NEHRP) Disposiciones recomendadas (FEMA 369), indica que uno de los aspectos importantes a considerar en el factor de redundancia es la altura del edificio y/o número de pisos. Sin embargo, en la figura 32 podemos observar valores muy variables, pero se muestra como un factor proporcional al factor de respuesta  $R$  desde un valor de  $R_R$  de 1.376 para la dirección x-x y 1.358 para y-y.

### Evaluación del factor de sobrerresistencia $R_\Omega$ en función al factor de reducción de fuerza sísmica $R$ :

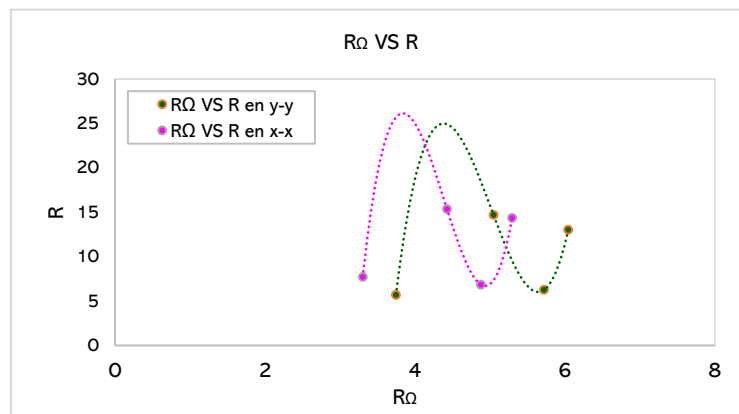


Figura 33. Representación del factor de sobrerresistencia vs el factor de reducción de fuerza sísmica  $R$ .

*Elaboración: Propia*

El factor de sobrerresistencia  $R_{\Omega}$  se comporta de manera similar en ambas direcciones con respecto al factor (R), a la vez se puede apreciar que ambos parámetros son proporcionales entre sí. Esto implica que, el factor de reducción depende mucho del factor  $R_{\Omega}$ , precisamente es este valor más significativo debido a sus altos contenidos de contribución hacia el factor (R). Adicionalmente, este factor decrece en ambas direcciones conforme los niveles de piso van aumentando, es decir que para sistemas aporricados de concreto armado este factor llega a un punto de cedencia, este caso disminuyó para el caso 04 que posee 12 niveles (figura 33). Sin embargo, el factor de respuesta (R) no se afectó debido a que este parámetro depende de otras variables.

### Relación del valor normativo y el valor cuantificado del factor de reducción de fuerza sísmica.

Tabla 6 Relación de factores de reducción de fuerza

*Elaboración: Propia*

RELACIÓN EN DIRECCIÓN X-X			
CASO	NORMATIVO R	CUANTIFICADO R	RELACIÓN
1	8	7.70	0.96
2	8	6.85	0.86
3	8	14.36	1.79
4	8	15.35	1.92

RELACIÓN EN DIRECCIÓN Y-Y			
CASO	NORMATIVO R	CUANTIFICADO R	RELACIÓN
1	8	5.70	0.71
2	8	6.27	0.78
3	8	13.02	1.63
4	8	14.70	1.84

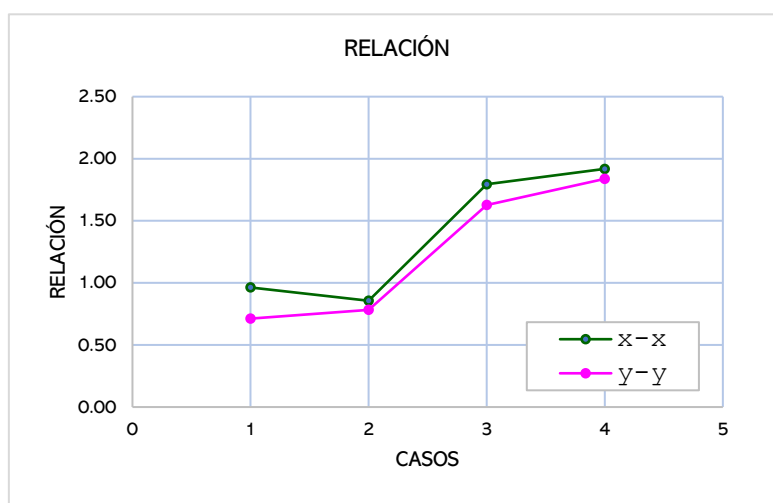


Figura 34. Representación de la relación del factor de reducción de fuerza sísmica

*Elaboración: Propia*

De la figura 34, se observa que en la dirección x-x existe mayor demanda con respecto a eje y-y. Así mismo, se puede deducir que el factor de reducción tiene una tendencia creciente con respecto a los cuatro casos de estudio.

Es necesario especificar que, la relación del caso 1 y 2 se aproximan, así como el caso 3 y 4 independiente mente de su dirección de análisis (figura 34). Esto se debe a la diferencia de pisos y altura de la edificación que están asociados al factor de redundancia pues Tsopelas y Husain (2004) concluyen que este factor depende de parámetros como la altura del edificio, el número de pisos, la longitud del tramo de las vigas y el número de líneas verticales de resistencia, el cual es significativo ya que las dos primeras muestras se aproximan al valor normativo pero conforme aumenta el número de niveles el factor de respuesta ( $R$ ) crece considerablemente, este hallazgo resulta esencial para esta investigación ya que al estudiar el factor por ductilidad ( $R_\mu$ ), sobrerresistencia ( $R_\Omega$ ) y redundancia ( $R_R$ ) se determinó que el  $R_\Omega$  y  $R_\mu$  influyen mucho al cuantificar  $R$  ya que son valores que crecen proporcionalmente al número de pisos del sistema evaluado.

Por otro lado, conviene recordar que los 2 primeros casos de estudio son de 3 y 6 niveles respectivamente y los otros dos cuentan con 9 y 12 niveles el cual explica el incremento del factor de redundancia y ductilidad, por ende, el factor  $R$  tendrá una mayor relación. Además, de acuerdo con Guayanlema y Duchi (2021) si el factor de reducción sísmica  $R$  es un valor alto, las estructuras tendrán una gran capacidad de disipar energía. Por otro lado, mientras menos ductilidad tengan las estructuras, menor será la capacidad de deformación y por tanto el factor de reducción sísmica será bajo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- De la presente investigación es pertinente mencionar dos puntos muy específicos:
  - En el primer y segundo caso que poseen 3 y 6 niveles respectivamente se tienen valores del factor ( $R$ ) aproximados al valor normativo, el cual nos permite mencionar que la norma E.030 está siendo conservadora ya que la cortante de diseño sería menor si se considera un  $R=8$  con respecto a las respuestas obtenidas del Pushover.
  - Por otro lado, para el tercer y cuarto caso de estudio que poseen 9 y 12 niveles respectivamente, los factores de reducción de fuerza sísmica cuantificados divergen en gran escala con respecto al valor normativo, el cual nos permite afirmar que, la cortante de diseño sería muy conservadora si es que se considera los valores cuantificados. No obstante, es necesario mencionar que el factor ( $R$ ) diverge debido a niveles altos de redundancia y sobrerresistencia estructural para los tres primeros casos ya que en el cuarto caso la sobrerresistencia decrece. Sin embargo, el factor por ductilidad aumenta en gran escala desde el tercer caso de estudio elevando el factor de respuesta  $R$  a grandes niveles de proporción. Esto nos puede llevar a considerar los factores de sobrerresistencia y ductilidad estructural en las etapas de diseño con valores previamente establecidos bajo análisis no lineal, el cual podría conducirnos a un error ya que la normativa peruana E.030 de Diseño sismorresistente considera un análisis elástico para el diseño estructural en edificaciones.

Por otro lado, conviene mencionar que:

- De acuerdo con Aguiar (2007), las curvas de capacidad se obtuvieron mediante el análisis estático no lineal los cuales fueron idealizadas mediante curvas bilineales de manera precisa, donde nos permitió cuantificar la demanda elástica, fluencia efectiva y punto de colapso. Sin embargo, se recomienda controlar la equivalencia de áreas para idealizar la curva bilineal en un margen de error por debajo del 1% .
- La sobrerresistencia  $R_{\Omega}$  en esta investigación evaluada en sistemas pórticos de concreto armado es un parámetro muy significativo ya que sus valores son más predominantes con respecto a los factores de ductilidad y redundancia. Además, guarda una estrecha relación con el factor de reducción de fuerza sísmica, dado que, se necesita reducir grandes demandas de resistencias este valor crecerá proporcionalmente a ello, por tanto, estos resultados guardan relación con lo que sostiene Daza (2003). Sin embargo, de la figura 53 se aprecia que el factor  $R_{\Omega}$  decrece para el último caso de estudio que posee 12 niveles mientras que el valor de respuesta  $R$  continúa creciendo debido a la contribución de los demás factores.
- El factor por ductilidad ( $R_{\mu}$ ) aumenta en amplios intervalos de periodo en dirección x-x a partir del periodo 0.74, en cambio en dirección y-y se presenta menores valores de ductilidad en intervalos de periodo muy cortos. Sin embargo, se puede afirmar que el factor por ductilidad es proporcional al periodo. Por otro lado, la deriva máxima varía constantemente en función al factor por ductilidad ( $R_{\mu}$ ), esto se debe, a que los valores de ( $R_{\mu}$ ) son muy inestables en intervalos muy cortos de derivas, de manera que, no es posible establecer una relación entre estos dos parámetros para esta tipología estructural.

El factor de sobrerresistencia ( $R_{\Omega}$ ) en la dirección y-y presenta mayores valores con respecto a x-x, esto era de esperarse ya que en y-y se tiene el mayor número de ejes en columnas ofreciendo más resistencia. Sin embargo, en la dirección x-x se tiene menores valores de ( $R_{\Omega}$ ) en un periodo más amplio. En respuesta a la deriva en la dirección x-x presenta un comportamiento proporcional al factor ( $R_{\Omega}$ ) hasta un valor de deriva 0.0066 pero luego empieza a decrecer, pero en la dirección y-y presenta valores muy inestables que resulta imposible establecer la proporcionalidad para este caso.

En el caso del factor de redundancia ( $R_R$ ) existe una estrecha relación con el periodo pues de acuerdo con El comentario a la Reducción Nacional del Riesgo de Terremotos Programa (NEHRP) Disposiciones recomendadas (FEMA 369), el factor ( $R_R$ ) depende del número de pisos, altura de edificio y número de líneas de resistencia, además está asociado a la hiperestaticidad de la estructura, por otro lado el periodo es un parámetro dinámico estructural que depende de la frecuencia circular asociada a la masa y rigidez que dependen de las mismas variables mencionadas en el (NEHRP). Por lo tanto, se establece una estrecha relación entre el factor ( $R_R$ ) y el periodo. Sin embargo, con respecto a la deriva presentan valores inestables crecientes y no se encuentra relación entre ellos.

El factor de reducción de fuerza sísmica ( $R$ ) tiene un comportamiento proporcional en función al periodo natural en intervalos largos como 0.74 – 1.23 para la dirección x-x y 0.63 – 1.04 para la dirección y-y. Por tanto, estos valores guardan relación y se corrobora lo que sostiene Zhai (2015).

- El factor de reducción de fuerza sísmica ( $R$ ) es distinto para ambas direcciones de análisis, esto se debe a la redundancia estructural y por ende a la sobrerresistencia. Es de suma importancia aclarar que para sistemas estructurales aporticados de concreto armado se recomienda niveles de entrepiso de mediana altura y no superar en promedio los 10 niveles ya que al construir edificios muy altos se puede obtener valores de ductilidad muy grandes, pero perdiendo considerablemente la resistencia lateral. Adicionalmente, se encontraron factores de respuesta  $R$  muy cercanos al valor normativo para los dos primeros casos que poseen una mediana altura de edificación, mientras que, para los de mayor altura se encontraron factores muy grandes, dando pase a la importancia de cuantificar el factor de reducción de fuerza sísmica con fines de estudiar y/o evaluar la resistencia lateral en sistemas aporticados. Además, Attia et al., (2020) menciona que el uso del factor ( $R$ ) ha sido aclarado en los códigos de diseño sísmico en muchas partes del mundo que se ven afectados por los terremotos pues, se utilizan para estimar la resistencia de las estructuras utilizando métodos lineales y no lineales.

## CONCLUSIONES

- Frente a la evaluación abordada, es posible concluir de manera general que el valor normativo ( $R$ ) se está sobrestimando para los dos primeros casos en una relación de 0.96, 0.86 en x-x y 0.71, 0.78 en y-y. Así mismo, se está subestimando para el caso 3 y 4 en una relación de 1.79, 1.92 en x-x y 1.63, 1.84 en y-y.

De manera específica, se postula las siguientes conclusiones:

- Las curvas de capacidad o curvas Pushover se determinaron para cada caso de estudio descrito en esta investigación, donde se determinó parámetros elásticos e inelásticos, cumpliendo su objetivo de determinar las variables independientes que gobiernan el factor de reducción de fuerza sísmica ( $R$ ) según el ATC-19 (1995).
- El factor de sobrerresistencia  $R_\Omega$  resultó un valor predominante en comparación con los demás factores contribuyentes al factor de respuesta ( $R$ ). Sin embargo, en esta investigación el factor  $R_\Omega$  disminuyó en el cuarto caso para ambas direcciones que cuentan con 12 niveles de piso. Por lo tanto, de la evaluación se concluye que el factor de  $R_\Omega$  es proporcional al factor de respuesta  $R$  hasta tercer caso, posteriormente este decrece mientras el factor  $R$  continúa aumentando.
- El factor por ductilidad  $R_\mu$  se comporta proporcionalmente al periodo tanto en dirección x como en dirección y, es decir, la ductilidad aumenta conforme crece el periodo. Con respecto a la deriva no se pudo establecer una relación entre estos dos parámetros, puesto que tiene valores muy inestables.

Del factor de sobrerresistencia ( $R_{\Omega}$ ) se concluye que, es proporcional al periodo hasta el tercer caso de estudio que posee 12 niveles luego decrece mientras el periodo sigue aumentado. Así mismo, el factor ( $R_{\Omega}$ ) no guarda relación con la deriva máxima.

El factor de redundancia ( $R_R$ ) es directamente proporcional al periodo en ambas direcciones de análisis y presenta valores más predominantes en la dirección que cuente con mayor grado de hiperestaticidad. Sin embargo, no guarda relación con la deriva máxima.

El factor de reducción de fuerza sísmica ( $R$ ) está muy relacionado con el periodo natural de manera que es posible establecer factores  $R$  para sistemas aporticados de concreto armado en determinados intervalos de periodo natural mediante artificios lineales. Además, el factor de respuesta ( $R$ ) guarda relación con la deriva máxima.

Adicionalmente, el factor de reducción de fuerza sísmica  $R$  se considera proporcional en función al factor de redundancia ( $R_R$ ), el cual es muy significativo para esta investigación. Por ende, se puede afirmar que la redundancia estructural es un aspecto de suma importancia para escoger un factor de respuesta  $R$  ya que se encuentra asociada al número de regiones críticas e hiperestaticidad de la estructura aporticada.

- La relación que existe entre el valor normativo y el valor cuantificado del factor de reducción implica que para los dos primeros casos estos valores se aproximan en 0.96 y 0.86 respectivamente en dirección x-x, en y-y convergen en 0.71 y 0.78 con respecto al valor normativo. Sin embargo, para el tercer y cuarto caso de estudio la relación más divergente es de 1.79 y 1.92 los cuales implican que el valor cuantificado es muy superior al valor normativo, teniendo en cuenta estos resultados se puede concluir de forma general que el valor normativo de la E.030 para sistema estructural aporticado de concreto armado se está sobrestimando en edificios bajos y subestimando en edificios altos.

Finalmente, esta investigación no pretende crear controversias ante la comunidad científica, sino ampliar el conocimiento del factor de reducción de fuerza sísmica en sistemas pórtico, de manera que sea útil para nuevos criterios de diseño sismorresistente abriendo nuevas investigaciones para las futuras generaciones.

## REFERENCIAS

- Aguiar Falconí, R. (2007). *Factor de reducción de las fuerzas sísmicas en edificios de hormigón armado sin muros de corte*. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE).
- Aguiar, R. (2003). *Análisis sísmico por desempeño*. Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 342pp.
- Applied Technology Council (ATC), & Structural Engineers Association of California. (1978). *Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings: A Cooperative Effort with the Design Professions, Building Code Interests, and the Research Community* (Vol. 3, No. 6). Department of Commerce, National Bureau of Standards.
- Applied Technology Council [ATC]. (1982). *An Investigation of the Correlation Between Earthquake Ground Motion and Buildings Performance*. Applied Technology Council, Rep. ATC10. Redwood City. California. USA: author

- Applied Technology Council [ATC]. (1995). *Structural response modification factors*. Applied Technology Council, Rep. N. ATC-19. Redwood City. California. USA: author.
- Attia, R. A. A., El-Tahawy, R. M. G. E., & Fayed, M. N. E. D (2020). *Seismic Response Modification Factor for Special Concrete Structures Based on Pushover & Non-linear Time History Analyses*.
- Blanco, G. M. (2018). *Factor de reducción de las fuerzas sísmicas en edificios de pórticos de hormigón armado en Cuba*.
- Chaparro, A. C., Suárez, A., Benjumea, J., & Villalba-Morales, J. D. (2021). *Desempeño Sísmico y Cantidades de Obra de Edificaciones Aporticadas de Concreto Reforzado Diseñadas para Diferentes Capacidades de Disipación de Energía*.
- Daza-Duarte, L. G. (2003). *Nuevo enfoque para determinar el factor de modificación de respuesta*. Revista internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil, 3(1), 33-48.
- Elnashai, A. S., & Mwafy, A. M. (2002). *Overstrength and force reduction factors of multistorey reinforced-concrete buildings*. The structural design of tall buildings, 11(5), 329-351.
- FEMA 369. (2000). *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures*. Program on Improved Seismic Safety Provisions (Commentary).
- Freeman, S. A. (1990, August). *On the correlation of code forces to earthquake demands*. In *Proceedings of 4th US-Japan workshop on improvement of building structural design and construction practices*, ATC-15-3 report. Redwood City, California.
- Guayanlema Basantes, S. C., & Duchi Calderón, J. P. (2021). *Deducción del factor de reducción sísmica ( $r$ ) para diferentes tipos de edificaciones* (Bachelor's thesis, Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo).
- Inel, M., & Ozmen, H. B. (2006). *Effects of plastic hinge properties in nonlinear analysis of reinforced concrete buildings*. Engineering structures, 28(11), 1494-1502.
- International Building Code (IBC). (2000). *Int. Conf. of Building Officials*, Whittier, Calif.
- Krawinkler, H. E. L. M. U. T., & Nassar, A. A. (1992). *Seismic design based on ductility and cumulative damage demands and capacities*. Nonlinear seismic analysis and design of reinforced concrete buildings, 23-39.
- Loayza Montesinos, B. S. (2021). *Evaluación del factor de reducción de resistencia Sísmica  $R$  para edificaciones con un sistema estructural de pórticos en Concreto Reforzado de mediana altura* (Doctoral dissertation, Universidad de Guayaquil-Facultad Ciencias Matemáticas y Físicas-Carrera de Ingeniería Civil).
- Ministerio de Vivienda, C. y S. (2009). *Norma Técnica E.060 Concreto armado*. Reglamento Nacional de Edificaciones, p. 201.
- Ministerio de Vivienda, C. y S. (2019). *Norma Técnica E.030 Diseño Sismoresistente*. Reglamento Nacional de Edificaciones, p. 80.
- Miranda, E. (1997, January). *Strength reduction factors in performance-based design*. In *Proceedings of EERC-CUREe Symposium*, Berkeley, CA.
- Miranda, E., & Bertero, V. V. (1994). *Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design*. Earthquake spectra, 10(2), 357-379.

- Newmark, N. M., & Hall, W. J. (1982). *Earthquake spectrum and design*. EERI., Oakland, CA.
- Ordóñez, J., Aguirre, A., & Oyola, J. (2020, August). *Límites de desempeño en el diseño de edificios de hormigón armado utilizando una estructura equivalente SDOF*. In Conference Proceedings (Vol. 4, No. 1, pp. 154-176).
- Rodríguez, D. (2005). *Análisis estático no lineal*.
- Sánchez de Movellán Costas, D. (2016). *Formulación comparada sobre las curvas hidrostáticas del buque "Los Molinucos"*. (Tesis de Ingeniería Náutica y transporte Marítimo, Universidad de Cantabria), 77pp.
- Tena, A., Cortés, J., & Godínez, E. (2016). *Impacto de la redundancia estructural en el comportamiento sísmico de estructuras de concreto reforzado*. Alternativas, 17(3), 180-197.
- Tsopelas, P., & Husain, M. (2004). *Measures of structural redundancy in reinforced concrete buildings. II: Redundancy response modification factor RR*. Journal of Structural Engineering, 130(11), 1659-1666.
- Uang, C. M. (1991). *Establishing  $R$  (or  $R_w$ ) and  $C_d$  factors for building seismic provisions*. Journal of structural Engineering, 117(1), 19-28.
- Uang, C. M. (1991). *Establishing  $R$  (or  $R_w$ ) and  $C_d$  factors for building seismic provisions*. Journal of structural Engineering, 117(1), 19-28.
- UBC, U. B. C. (1997). *International conference of building officials*.
- United States. Federal Emergency Management Agency (FEMA). (1997). *Multi Hazard Identification and Risk Assessment: The Cornerstone of the National Mitigation Strategy*. Federal Emergency Management Agency
- Veletsos, A. S., & Newmark, N. M. (1960, July). *Effect of inelastic behavior on the response of simple systems to earthquake motions*. Department of Civil Engineering, University of Illinois
- Whittaker, A., Hart, G., & Rojahn, C. (1999). *Seismic response modification factors*. Journal of Structural Engineering, 125(4), 438-444.
- Yzaguirre, Z. C., Cid, J. O. M., & Cristiá, W. C. (2021). *Influencia de la interacción dinámica suelo-estructura en el mecanismo de colapso y nivel de desempeño de edificaciones de hormigón armado*. Hormigón y Acero.
- Zhai, C. H., Wen, W. P., Li, S., & Xie, L. L. (2015). *The ductility-based strength reduction factor for the mainshock–aftershock sequence-type ground motions*. Bulletin of Earthquake Engineering, 13(10), 2893-2914.